

Funktionsintegration im Rahmen einer fertigungsgetriebenen Produktentwicklung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Christian Wagner, M.Sc.

aus Frankfurt am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche
Tag der Einreichung:	10.04.2018
Tag der mündlichen Prüfung:	19.06.2018

Darmstadt 2018

D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-75282

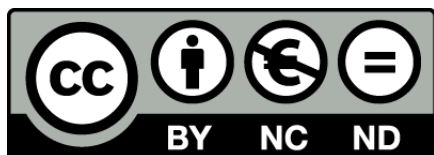
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/7528>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) an der Technischen Universität Darmstadt. Als Mitglied des Sonderforschungsbereichs 666 entwickelte ich die besondere Motivation für die Entwicklung einer Methodik zur gezielten Nutzung des Funktionsintegrationspotentials für die Erarbeitung fertigungsintegrierender Produktlösungen.

Ich danke meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Eckhard Kirchner, für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und seine Bereitschaft, sich als frischgebackener Fachgebietsleiter auf diese neue Themenwelt einzulassen. Seine von Industrieerfahrung geprägte Herangehensweise verschaffte uns einen ganz frischen Blick auf die Produktentwicklung.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche danke ich nicht nur für die freundliche Übernahme des Korreferats, sondern ganz besonders auch für die fachliche Betreuung in seiner Zeit als kommissarischer Leiter des pmd sowie als Sprecher des Sonderforschungsbereichs 666.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet pmd sowie im Sonderforschungsbereich danke ich für die konstruktive und stets angenehme Zusammenarbeit. Dabei möchte ich insbesondere Herrn Dr.-Ing. Sebastian Gramlich danken, der mich bereits während meines Bachelorstudiums für die Produktentwicklung begeisterte und später meine Zeit als Promovend in seiner Funktion als Postdoktorand am pmd entscheidend prägte. Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Michael Roos, mit dem die Zusammenarbeit Tag für Tag eine persönliche Freude war. Herrn Matthias Schaschek danke ich für die stets kompetente und unkomplizierte Unterstützung in der Werkstatt des pmd.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung.....	1
1.2	Aufbau der Arbeit.....	3
2	Stand der Forschung	4
2.1	Funktionsintegration und Integralbauweise	4
2.1.1	Verständnis der Funktionsintegration in der Literatur	4
2.1.2	Auswirkungen der Funktionsintegration und Integralbauweise	8
2.2	Methoden und Hilfsmittel zur Funktionsintegration	13
2.3	Bedeutung fertigungsgetriebener Ansätze für die Produktinnovation ...	18
2.3.1	Eigenschaftsbasierte Modellierung technischer Produkte von der Funktion zur Gestalt	19
2.3.2	Produktentwicklung auf Basis von Modellen	23
2.3.3	Prozess- und Verfahrensmodellierung	28
2.3.4	Vorgehen, Methoden und Hilfsmittel fertigungsintegrierender Produktentwicklungsansätze	33
2.4	Fazit des Stands der Forschung	37
3	Idee einer fertigungsgetriebenen Funktionsintegration.....	39
4	Modelle und Hilfsmittel zur fertigungsgetriebenen Funktionsintegration	47
4.1	Grundlegende Modelle zur Berücksichtigung von Fertigung und Funktion im Rahmen der Funktionsintegration.....	47
4.1.1	Funktionsintegration aus Sicht der Fertigungstechnologie: Technologieintegration und Gestaltelementintegration	49
4.1.2	Funktionsintegration aus Sicht der Funktionserfüllung: Funktionserweiterung	52
4.1.3	Funktionsintegration aus Sicht der Baustruktur: Integralbauweise	54
4.1.4	Fazit: Konsistente Modellierung auf Basis von Eigenschaften als Grundlage für die Funktionsintegration	55
4.2	Implementierung der fertigungsgetriebenen Funktionsintegration in die Produktentwicklung	55

4.2.1	Identifikation verfahrensinduzierter Gestaltelemente und Eigenschaften.....	57
4.2.2	Identifikation geeigneter Anwendungsszenarien und Funktionen auf Basis der Fertigungstechnologie	58
4.2.3	Erarbeitung von fertigungsintegrierenden Funktionsträgern	60
4.2.4	Kombination fertigungsintegrierender Funktionsträger unter Berücksichtigung der Integrationsstrategien	62
4.3	Werkzeuge für die fertigungsgetriebene Funktionsintegration	66
4.3.1	Design Pattern Matrix als Werkzeug für fertigungsgetriebene Funktionsintegration	67
4.3.2	Projektübergreifender Erkenntnispeicher: Katalogisierung mithilfe Process-integrated Design Guidelines.....	77
4.4	Fazit: Modelle und Hilfsmittel zur fertigungsgetriebenen Funktionsintegration	80
5	Evaluation	82
5.1	Fallbeispiel: Vorspannungsintegration in spaltprofilierten Linearführungen	82
5.2	Analyse des Integrationsgrads einer Bajonettschraube	104
6	Fazit und Ausblick.....	109
	Anhang A – Formblatt DPM	111
	Anhang B – Process-Integrated Design Guidelines.....	112
	Literaturverzeichnis.....	115
	Eigene Veröffentlichungen	126
	Betreute studentische Arbeiten	128

Abkürzungsverzeichnis

DfM	Design for Manufacture
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Design Pattern
DPM	Design Pattern Matrix
ET	Einzelteil
FE	Finite Element
FT	Funktionsträger
FI-FT	Fertigungsintegrierender Funktionsträger
GE	Gestaltelement
GPPE	Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung
HSC	High Speed Cutting
PIDG	Process-integrated Design Guideline
QFD	Quality Function Deployment
SFB	Sonderforschungsbereich
TF	Teilfunktion
UFG	Ultra Fine Grained
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VGE	Verfahrensinduziertes Gestaltelement
VIE	Verfahrensinduzierte Eigenschaft
WKF	Wälzkontaktfläche

Kurzfassung

Funktionsintegration ist ein vielversprechender Ansatz zur Entwicklung innovativer Produkte, der konstruktionsmethodisch bislang jedoch nur wenig unterstützt wird. Insbesondere in Kombination mit einem fertigungsgetriebenen Entwicklungsansatz birgt die Funktionsintegration jedoch das Potential, durch umfassende Ausschöpfung von fertigungsspezifischen Gestaltungsmöglichkeiten Lösungen zu entwickeln, die sich durch eine hohe Funktionalität und gleichzeitig geringen Fertigungs- und Montageaufwand auszeichnen. Existierende Hilfsmittel für die Funktionsintegration beschränken sich weitgehend auf Gestaltungsvorbilder und Richtlinien für bestimmte Fertigungstechnologien. Aus diesem Grund wird ein allgemeingültiger Ansatz nötig, der für beliebige Fertigungstechnologien und Produktfunktionen geeignet ist. Dafür werden im Rahmen dieser Arbeit Werkzeuge entwickelt, mit deren Hilfe sich der Lösungsraum gezielt um Lösungen erweitern lässt, die einen hohen Integrationsgrad aufweisen. Im Integrationsgrad einer Lösung ist dabei neben der Funktions- und Baustruktur auch berücksichtigt, wie viele Fertigungstechnologien zur Realisierung des Produkts notwendig sind. Damit stellt der Integrationsgrad einen Indikator für einen hohen Produktnutzen bei gleichzeitig geringem Herstelleraufwand dar.

Ausgangspunkt für die Entwicklung geeigneter Werkzeuge ist ein differenziertes Begriffsverständnis der Funktionsintegration, das gleichermaßen Aspekte der Produktfunktion und der Fertigung berücksichtigt. Basierend auf Produkt- und Prozessmodellen werden ausgehend von diesem Verständnis Strategien für eine schrittweise Steigerung des Integrationsgrads entwickelt. Die verwendeten Modelle sind dabei kompatibel mit den Modellen, die einer Design Pattern Matrix (DPM) zugrunde liegen. In dieser werden allgemeingültige Funktionsträger mit verfahrensinduzierten Gestaltelementen verknüpft und somit fertigungsintegrierende Lösungselemente erschaffen. Gezielte Kombination dieser Lösungselemente ergeben neue Gesamtlösungen mit hohem Integrationsgrad. Die Arbeit mit der DPM erlaubt einen neuen Blick auf zusätzliche und bislang ungenutzte Gestaltungsmöglichkeiten zur Realisierung von Funktionen. Dies kann sowohl für Neuentwicklungen als auch für die Weiterentwicklung lange bewährter Lösungen neue Perspektiven eröffnen. In der Evaluation wird ein speziell auf die Arbeit mit der DPM ausgerichtetes Vorgehen zur Entwicklung integrierter Lösungen erprobt sowie die Allgemeingültigkeit des Ansatzes hinsichtlich betrachteter Produktfunktionen und eingesetzter Fertigungstechnologien überprüft.

Abstract

Product design with a focus on function integration offers a high potential for the realisation of innovative products due to functional benefits and lower costs. Especially a comprehensive consideration of both functional and manufacturing aspects opens possibilities for increasing the product's functionality and reducing manufacturing and assembly costs at the same time. Existing tools and methods mainly provide design examples and guidelines for specific product functions or manufacturing technologies. The dissertation introduces a novel technology-driven approach that allows the consideration of any product function and any manufacturing technology. Novel tools help expanding the solution space with solutions that are characterised by a high degree of integration. The degree of integration depends on the product's function structure, construction structure and the amount of necessary manufacturing technologies that are needed for its physical realisation. A high degree of integration correlates with a high customer benefit and low necessary manufacturing efforts.

Starting point for the development of suitable tools for function integration is a differentiated understanding of the term function integration that considers aspects of product functions and manufacturing technologies at the same time. Product and process models are utilised to develop strategies for supporting a stepwise increase of the degree of integration. The utilised models are compatible with the underlying models of a Design Pattern Matrix (DPM). With the help of a DPM generally applicable function carriers can be linked with manufacturing-induced design elements, resulting in the development of manufacturing-integrated solution elements. Combining these solution elements leads to new product solutions with a high degree of integration. Working with the DPM allows the identification of additional and so far untapped possibilities to realise product functions. The DPM not only opens up new perspectives for the development of completely new products but also for the advancement of already proven solutions. The introduced development approach is evaluated by utilising a procedure tailored to the DPM for different product functions and manufacturing technologies, verifying the general applicability of the approach.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Ein besonderes Potential für die Entwicklung unkonventioneller und innovativer Produkte liegt in fertigungsgetriebenen Entwicklungsansätzen, in denen eine bestimmte Fertigungstechnologie Ausgangspunkt der Entwicklung ist.¹ Durch die frühzeitige Berücksichtigung fertigungstechnologischer Besonderheiten können im Rahmen der Produktentwicklung neue Möglichkeiten zur Steigerung des Kundennutzens und der Senkung der Herstellkosten erschlossen werden. Beide Aspekte sind von großer Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung innovativer Produkte am Markt.²

Abbildung 1 zeigt eine Linearführung, die auf Basis der Spaltprofilierertechnologie³ entwickelt worden ist. Beim Spaltprofilieren werden in einer kontinuierlichen Fließfertigung Flansche an den Bandkanten eines Blechs erzeugt. Die Flanschoberseiten zeichnen sich dabei durch eine hohe Härte sowie Oberflächengüte aus, was insbesondere für den Einsatz als Wälzkontaktfläche in Linearführungen vorteilhaft ist.⁴

Die Spaltprofilierertechnologie kann in der kontinuierlichen Fließfertigung mit anderen kompatiblen Technologien wie Walzprofilieren, Spaltbiegen und Laserschweißen flexibel kombiniert werden, so dass mehrfachverzweigte Blechstrukturen kostengünstig in mittleren bis hohen Stückzahlen erzeugt werden können.⁵ Wie in Abbildung 1 (rot markiert) zu sehen, können diese komplexen Geometrien zur Realisierung zusätzlicher Funktionen in einem einzelnen Bauteil eingesetzt werden: Verzweigungen zur Erhöhung der Steifigkeit sowie zwei geschlossene Kammern, die durch Druckbeaufschlagung zur Realisierung einer Bremsfunktion genutzt werden können.

¹ Vgl. Brem, Voigt (2009), S. 355f.

² Vgl. Pahl et al. (2007), S. 95.

³ Vgl. Neuwirth et al. (2017), S. 32ff.

⁴ Vgl. Karin et al. (2010), S. 111 - 116.

⁵ Vgl. Ludwig et al. (2008), S. 79 - 84.

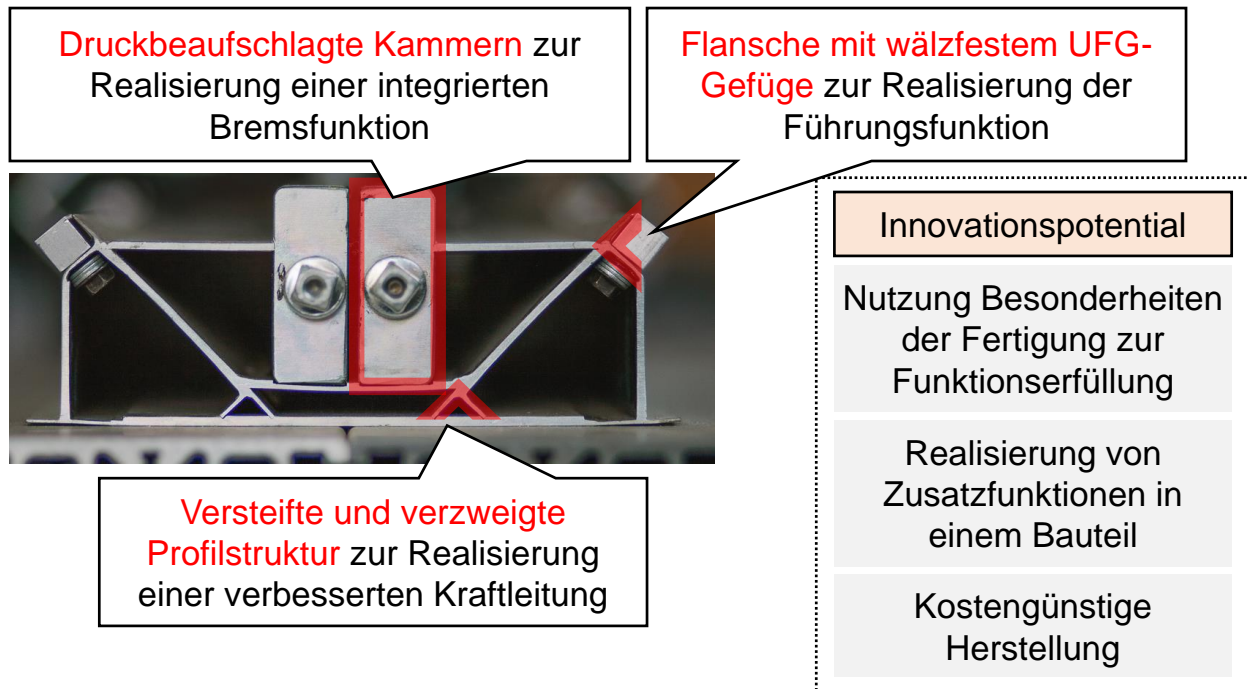


Abbildung 1: Mehrfachverzweigtes Blechprofil als Linearführung mit zusätzlichen Funktionen

Mittels einer solchen *Funktionsintegration* können durch die Steigerung der Funktionalität des Produkts völlig neue Anwendungsmöglichkeiten und Märkte erschlossen werden. Insbesondere dann, wenn diese Erweiterung der Funktionalität in einem kostengünstigen Herstellprozess möglich ist, ergibt sich daraus ein hohes Innovationspotential. Die Unterstützung einer fertigungsgetriebenen Funktionsintegration wird in etablierten Entwicklungsmethoden allerdings noch nicht umfassend abgebildet, weswegen funktionsintegrierte Produkte oft scheinbar „zufällig“⁶ entstehen. Richtlinien zum fertigungsgerechten Gestalten⁷ betrachten Funktionsintegration hauptsächlich als Möglichkeit zur Kostensenkung in der Fertigung in späten Phasen der Produktentwicklung. Sie stellen damit kein Hilfsmittel dar, um die besonderen Potentiale einer Fertigungstechnologie für die Funktionserfüllung auszuschöpfen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, anwendbare Werkzeuge bereitzustellen, mit deren Hilfe systematisch neue technische Lösungen erarbeitet werden können, die die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie für die Funktionsintegration umfassend ausschöpfen. Auf Basis geeigneter und aufeinander abgestimmter Modelle und

⁶ Vgl. Ziebart (2012), S. 10.

⁷ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 445 - 468.

Methoden soll ein Ansatz für *fertigungsgetriebene Funktionsintegration* im Rahmen eines geeigneten Innovationsprozesses aufgezeigt werden, in dem nicht nur technologiebedingte Restriktionen berücksichtigt werden, sondern gezielt fertigungstechnologische Potentiale ausgeschöpft werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 der Stand der Forschung dargelegt. Hierbei werden neben dem Begriffsverständnis und Herausforderungen der Funktionsintegration in der Literatur auch existierende Entwicklungsansätze samt den diesen zugrundeliegenden Modellen vorgestellt. Kapitel 3 stellt die Idee einer fertigungsgetriebenen Funktionsintegration vor. In Kapitel 4 werden, auf Basis geeigneter und miteinander verknüpfter Modelle, Ansätze und Werkzeuge für die fertigungsgetriebene Funktionsintegration vorgestellt. In Kapitel 5 wird der Ansatz anhand zweier Beispiele evaluiert. Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung und Reflexion sowie einem Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsfragen, die an die gewonnenen Erkenntnisse anknüpfen.

2 Stand der Forschung

Durch die Entwicklung neuartiger innovativer Produkte trägt die Produktentwicklung in großem Umfang zum Erfolg eines Unternehmens bei. Innovationen zeichnen sich durch die erfolgreiche Überführung einer Invention in marktfähige Produkte aus.⁸ Um marktfähig zu sein, muss das entwickelte Produkt kostengünstig in der Herstellung sein und gleichzeitig einen möglichst großen Kundennutzen bereitstellen. In der Konstruktionsmethodik findet sich unter dem Begriff *Funktionsintegration* ein für Innovationen vielversprechender Ansatz: Durch Funktionsintegration sollen in möglichst wenigen Bauteilen möglichst viele Funktionen und damit bei geringem Aufwand ein hoher Kundennutzen realisiert werden. In Abschnitt 2.1 werden verschiedene Begriffsdefinitionen vorgestellt und inhaltlich abgegrenzt, sowie mögliche Auswirkungen ihrer Umsetzung dargestellt. Ausgehend von diesen Definitionen werden in Abschnitt 2.2 existierende Methoden und Hilfsmittel für die Funktionsintegration besprochen. In fertigungsgetriebenen Entwicklungsprojekten sind Fertigungstechnologien Ausgangspunkt für die Entwicklung innovativer Produkte. In Abschnitt 2.3 werden daher Modelle für die Beschreibung von Produkten und Prozessen erläutert, die die Grundlage bilden für Produktentwicklungsansätze, die auch fertigungsgetriebene Entwicklungsvorhaben unterstützen können.

2.1 Funktionsintegration und Integralbauweise

2.1.1 Verständnis der Funktionsintegration in der Literatur

In der Funktion besteht der eigentliche Zweck eines technischen Systems bzw. Produkts: Die Funktion beschreibt lösungsneutral den gewollten Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgang des Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen.⁹ Dabei kann, je nach Gestaltung, von einem Produkt auch mehr als eine Funktion erfüllt werden, wie in Abbildung 1 dargestellt, und dabei kann dieses aus einem oder mehreren Bauteilen bestehen. Neben der Funktionsintegration wird in der Literatur häufig der Begriff Integralbauweise verwendet, um das Verhältnis zwischen den realisierten Bauteilen und der Produktfunktion zu beschreiben. In Ta-

⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 95.

⁹ Vgl. Feldhusen et al. (2013), S. 242.

belle 1 sind Definitionen der Funktionsintegration verschiedener Autoren zusammengetragen, in denen unterschiedliche Sichtweisen und Schwerpunkte deutlich werden.

Tabelle 1: Definitionen der Funktionsintegration in der Literatur

Autoren	Definition
ROTH (2001)	Funktionsintegration ist „die Vereinigung verschiedener Funktionsträger zu einem Wirkraum, einer Wirkfläche, zwecks Verbilligung der Fertigung, so daß die von ihnen ausgehenden Funktionen erhalten bleiben und die dabei gegebenenfalls auftretenden Störfunktionen in erträglichen Grenzen bleiben. Funktionsträger können sowohl Wirkräume als auch Wirkflächen sein“. ¹⁰
HOENOW UND MEIßNER (2014)	„Funktionsintegration liegt vor, wenn funktionsbedingte Bauteile konstruktiv so vereinigt werden, dass der Bauteilkörper des einen Teils vollständig oder teilweise vom anderen Teil gebildet wird, sodass Werkstoff und/oder Fertigungsaufwand für das integrierte Teil eingespart werden können. Funktionsintegration ist vollständig oder teilweise möglich“. ¹¹
ZIEBART (2012)	„Funktionsintegration ist ein konstruktiver Vorgang, der ein technisches System mit gegebener Funktion derart verändert, dass zusätzliche Funktionen durch das System erfüllt werden und/oder die Anzahl der Bauelemente reduziert wird“. ¹²

In den in Tabelle 1 zusammengetragenen Definitionen von ROTH (2001) sowie HOENOW UND MEIßNER (2014) wird mit der Beschreibung des Begriffs Funktionsintegration auch gleichzeitig die bei diesen Autoren damit verbundene Zielsetzung der Funktionsintegration betont. In beiden Fällen ist der vorherrschende Zweck der Funktionsintegration eine Verringerung der Herstellkosten. ROTH (2001) deutet in der Definition auch bereits an, dass die Umsetzung einer Funktionsintegration nicht immer nur Vorteile mit sich bringt.¹³ In der Definition bei HOENOW UND MEIßNER (2014) wird deutlich, dass die Funktionsintegration in unterschiedlichem Umfang umgesetzt werden kann. Die Definition nach ZIEBART (2012) basiert auf einer

¹⁰ Roth (2001), S. 412f.

¹¹ Hoenow, Meißner (2014), S. 43.

¹² Ziebart (2012), S. 110.

¹³ Siehe Abschnitt 2.1.2.

Zusammenstellung verschiedener Definitionen unterschiedlicher Autoren, wobei hierfür auch Definitionen der Integralbauweise hinzugezogen werden.¹⁴ Der Definition liegt ein Verständnis des Bauelements als kleinstes Volumen gleicher werkstofflicher Zusammensetzung zugrunde, das zerstörungsfrei räumlich voneinander getrennt werden kann.¹⁵ In der Definition wird der Zweck der Funktionsintegration nicht genannt, dafür aber betont, dass es sich bei der Funktionsintegration um einen konstruktiven Vorgang handelt, bei dem ein Produkt auch um zusätzliche Funktionen erweitert werden kann. Tabelle 2 stellt die Definitionen der Integralbauweise verschiedener Autoren zusammen.

Tabelle 2: Definitionen der Integralbauweise in der Literatur

Autoren	Definition
EHRENSPIEL UND MEER- KAMM (2013)	„Der Unterschied zwischen Integralbauweise und Funktionsvereinigung ¹⁶ besteht darin, dass bei der Integralbauweise die für die Realisierung einzelner Funktionen nötigen Wirkflächen, Wirkbewegungen und Werkstoffe nach wie vor am integrierten Bauteil (Funktionsträger) getrennt vorhanden sind, während diese bei Funktionsvereinigung ineinander aufgehen. In beiden Fällen entsteht aber aus mehreren Teilen ein Teil“. ¹⁷
KOLLER (1998)	„Die Zusammenfassung mehrerer Bauteile gleicher oder unterschiedlicher Funktion(en) zu einem Bauteil mit der gleichen Anzahl von Funktionen, welche den Einzelteilen gemeinsam waren, soll als ‚Integriertes Bauteil‘ bzw., als ‚Integralbauweise‘ bezeichnet werden“. ¹⁸
MÜLLER (2013) KURZ ET AL. (2009)	„Die Integralbauweise vereint alle Funktionen des Produktes (bzw. eines Moduls oder einer Baugruppe) in einem Bauteil, dadurch entfallen sämtliche Montageoperationen“. ¹⁹ „Das Zusammenfassen von mehreren Einzelteilen zu einem Teil aus einheitlichen Werkstoff ohne zusätzliche Fügeverfahren bezeichnet man als Integralbauweise“. ²⁰

¹⁴ Vgl. Ziebart (2012), S. 113.

¹⁵ Vgl. Ziebart (2012), S. 108.

¹⁶ Ehrlenspiel verwendet den Begriff Funktionsvereinigung synonym zur Funktionsintegration (Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 498).

¹⁷ Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 499.

¹⁸ Koller (1998), S. 311.

¹⁹ Müller (2013), S. 719.

²⁰ Kurz et al. (2009), S. 241.

- PAHL (2007) „Unter Integralbauweise wird das Vereinigen mehrerer Einzelteile zu einem Werkstück verstanden“.²¹
- CONRAD (2013) „Integralbauweise beschreibt das Zusammenfassen mehrerer Einzelteile in einem Bauteil“.²²

Bei EHRENSPIEL UND MEERKAMM (2013) wird zwischen Funktionsvereinigung bzw. -trennung und der Integral- und Differentialbauweise unterschieden. Während bei der Funktionsvereinigung, die synonym zum Begriff Funktionsintegration verwendet wird, die für die Funktionserfüllung verschiedener Funktionen notwendigen Wirkflächen, Wirkbewegungen und Materialien ineinander aufgehen, sind diese Wirkelemente bei der Integralbauweise getrennt voneinander am „integrierten“ Bauteil, wie in Abbildung 2 am Beispiel eines Maniküre-Sets zu sehen. Funktionsintegration und Integralbauweise erreichen eine Reduktion der notwendigen Teilezahl zur Herstellung des Produkts. Die funktionsbetonte Perspektive der Funktionsintegration ist dabei insbesondere für die Konstruktion von Bedeutung.²³



Abbildung 2: Funktionsintegration am Beispiel eines Maniküre-Sets²⁴

Während Koller in der Definition der Integralbauweise die Funktionserfüllung des ursprünglichen Bauteils mit einbezieht, betonen die in Tabelle 1 von KURZ ET AL. (2009), PAHL ET AL. (2007), und CONRAD (2013) zusammengestellten Definitionen die Sicht auf die Einzelteile, aus denen sich ein Produkt zusammensetzt. In seiner Extremform, wie von MÜLLER beschrieben, besteht ein Produkt durch Umsetzung der Integralbauweise, damit nur aus einem einzigen Einzelteil, wie in Abbildung 3 am Beispiel eines Fahrzeugbodenbelags dargestellt.

²¹ Pahl et al. (2007), S. 450.

²² Conrad (2013), S. 282.

²³ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 495 - 502.

²⁴ Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 499.

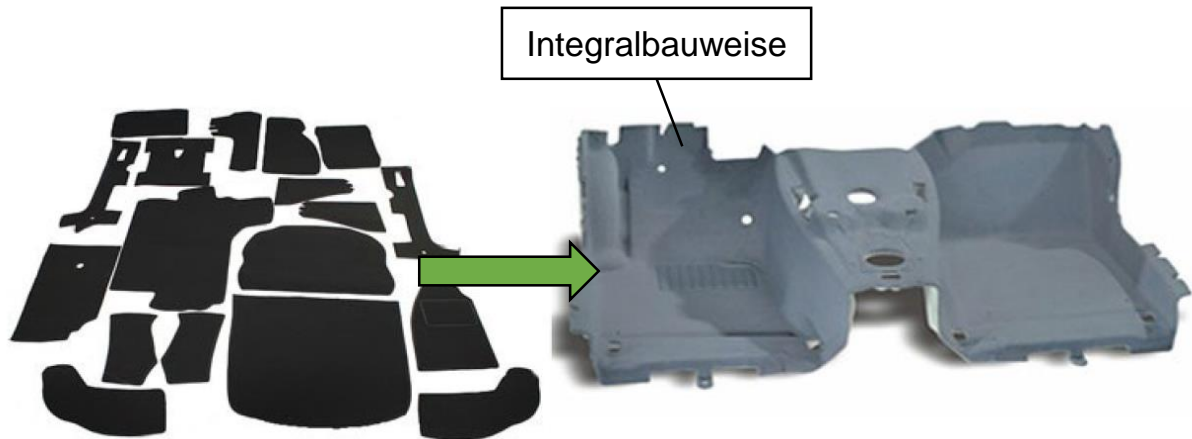


Abbildung 3: Integralbauweise am Beispiel eines Fahrzeugbodenbelags²⁵

2.1.2 Auswirkungen der Funktionsintegration und Integralbauweise

Funktionsintegration stellt einen konstruktiven Vorgang dar, der niemals zum Selbstzweck betrieben wird. Funktionsintegration kann sich sowohl positiv als auch negativ auf die Qualität, die Kosten und die Zeit zur Fertigung eines Produkts auswirken. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über mögliche Auswirkungen der Funktionsintegration, die im Folgenden näher erläutert werden.

Tabelle 3: Mögliche Auswirkungen der Funktionsintegration

Qualität	Kosten	Zeit
Gewichtsreduktion / Leichtbau	Materialeinsparungen / Leichtbau	Geringer Zerspanungsaufwand
Leistungssteigerung durch wegfallende Fügestellen	Weniger Fügeelemente / Teile Kostensenkung	Montageerleichterung Kürzere Fügewege durch Bauraumreduktion
Genauigkeitssteigerung Zuverlässigkeitserhöhung	Geringerer Zerspanungsaufwand Montageerleichterung	Verringerung der Herstellzeit durch Wegfall von Montageoperationen
Funktionserweiterung (z.B. Kompensation Störeffekte)	Bauraumreduktion und dadurch auch kürzere Fügewege	
Leistungssenkung durch geringere Teilespezialisierung auf die geforderte Funktion	Kostensteigerung durch Materialkostenzuwachs	Erhöhung der Durchlaufzeiten durch Wegfall parallelisierbarer Fertigungsschritte

²⁵ In Anlehnung an Ellenrieder et al. (2017), S. 74.

Funktionsintegration kann unter anderem zu Materialeinsparung, Gewichtsreduktion, Kostensenkung (oder auch Kostensteigerung), Leistungs- oder Genauigkeitssteigerung, Zuverlässigkeitserhöhung, Montageerleichterung, Bauraumreduktion und zu einer Veränderung der Durchlaufzeiten führen.²⁶ Ausgehend von einer bestehenden Konstruktion kann Funktionsintegration zu völlig neuen Produkten führen, wenn durch sie bewirkt wird, dass Bauteile zusätzliche Funktionen erfüllen können, die vorher nicht von der Gesamtfunktion des Produkts zur Verfügung gestellt wurden. Die Funktionszuverlässigkeit kann erhöht werden, wenn durch Funktionsintegration eine bereits realisierte Funktion ergänzt oder redundant gemacht wird.²⁷ Die von ROTH (2000) vermutete Tendenz einer verringerten technischen Wertigkeit und damit verringerter Leistung²⁸, kann ZIEBART (2012) in einer Recherche nach Beispielen umgesetzter Funktionsintegration nicht bestätigen. Im Gegenteil kann etwa durch den Wegfall von Fügestellen eine Leistungssteigerung bewirkt werden. Die damit einhergehenden kürzeren Kraftleitungswege sind vor allem für Bauteile, die der Kraft- und Momentenleitung dienen, vorteilhaft. Auch das Hinzufügen weiterer Funktionen durch die Funktionsintegration kann zu einer Leistungssteigerung des Produkts führen, wie zum Beispiel Funktionen, die Störeffekte kompensieren. Ungünstig wirkt sich Funktionsintegration dann auf die Leistungsfähigkeit aus, wenn mehrere sich aufgrund ihrer physikalischen Effekte gegenseitig störende Funktionen in einem einzigen Einzelteil gekoppelt sind.²⁹ Werden durch Funktionsintegration zwei Bauteile zu einem zusammengefasst, die in ihrer ursprünglichen Gestaltung mithilfe unterschiedlicher Werkstoffe zwei Funktionen erfüllt haben, so entfallen damit etwaige Vorteile durch eine auf die jeweilige Funktion angepasste Wahl des Werkstoffs. Abbildung 4 verdeutlicht am Beispiel der Halterung einer Deckenleuchte mögliche Grenzen einer Funktionsintegration.

²⁶ Vgl. Ziebart (2012), S. 158.

²⁷ Vgl. Ziebart (2012), S. 159f.

²⁸ Vgl. Roth (2000), S. 236.

²⁹ Vgl. Ziebart (2012), S. 165 - 167.

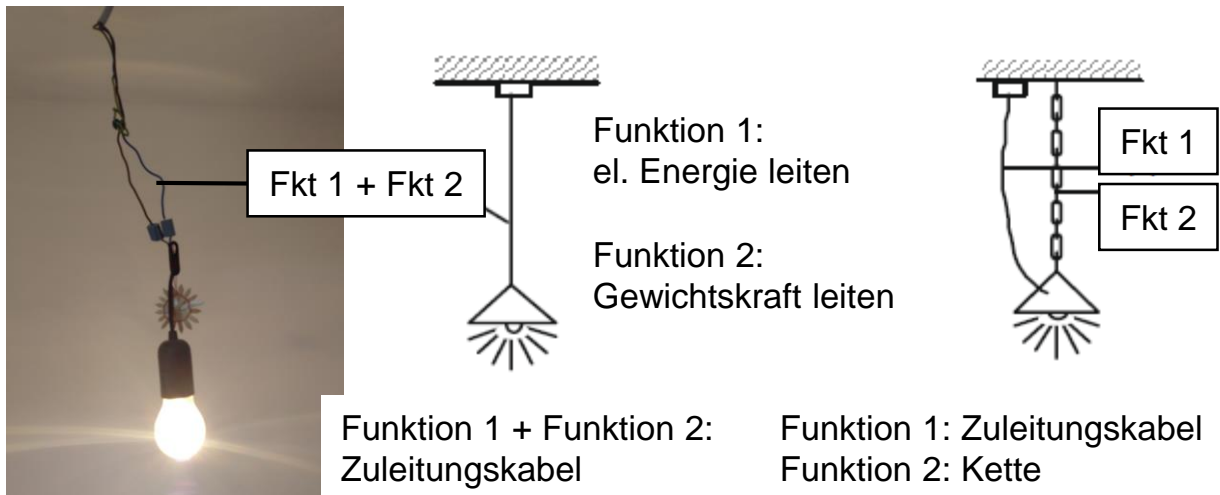


Abbildung 4: Funktionsintegration bei einer Halterung für eine Deckenleuchte³⁰

Im Beispiel der Deckenleuchte ergibt sich durch die Integration der Funktionen „Energie leiten“ und „Gewichtskraft leiten“ eine Verringerung der Anzahl notwendiger Einzelteile bei gleichbleibender Funktion des Produkts. Der Werkstoff des Zuleitungskabels muss beide Funktionen zugleich erfüllen können, während vorher verschiedene Werkstoffe, auf ihren jeweiligen Einsatzzweck optimiert, eingesetzt werden konnten. Betrachtet man das in Abbildung 4 links dargestellte Beispiel, so wird deutlich, dass die Integration zusätzlicher Funktionen in ein einzelnes Bauteil also nicht in jedem Fall zweckmäßig ist und die Entwicklung eines marktfähigen Produkts zur Folge hat. Stattdessen muss der jeweilige Anwendungsfall berücksichtigt werden und Funktionsintegration als Teil einer konstruktiven Entscheidung immer gegen etwaige Nachteile abgewogen werden. Im Fall einer provisorischen Beleuchtung für Baustellen erscheint die in Abbildung 4 links dargestellte Lösung zweckmäßig, bei dauerhaften Anwendungsfällen jedoch nicht. In ROTH (2000) wird daher eine verringerte Leistungsfähigkeit bei steigendem Grad an Funktionsintegration beschrieben.³¹ Das *Prinzip der Aufgabenteilung* sieht daher sogar eine eindeutige Zuordnung eines Bauteils zu einer einzigen Funktion vor, so wie in Abbildung 5, dargestellt am Beispiel einer Lagerung, in der die Radial- und Axialkraftaufnahme auf zwei Lager verteilt ist, zu sehen.³²

³⁰ In Anlehnung an Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 496.

³¹ Vgl. Roth (2000), S. 236.

³² Vgl. Pahl et al. (2013b), S. 553 - 561.

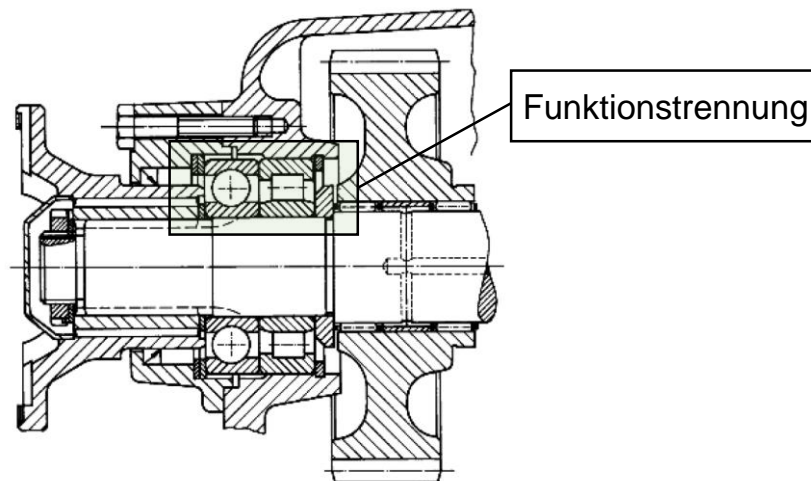


Abbildung 5: Funktionstrennung in einem Festlager³³

Fallen durch eine erfolgte Funktionsintegration Bauteile weg, so verringert sich damit auch die Anzahl notwendiger Fügeelemente und Fügeflächen. Dadurch kann eine Materialeinsparung erreicht werden.³⁴ Weiterhin erlauben stoffschlüssige Verbindungen eine bessere Kraftübertragung und höhere Querschnittsspannungen im Vergleich zu Fügstellen. Bei gleicher Funktionszuverlässigkeit sind damit geringere Querschnittsflächen notwendig. Die Materialeinsparung bewirkt gleichzeitig eine Verringerung des Bauteilvolumens, des Gewichts und des erforderlichen Bauraums, sofern die Materialeinsparung das äußere Volumen des technischen Systems betrifft. Andererseits kann Funktionsintegration aber auch zu einem Materialzuwachs führen. Wird ein Produkt, das aus zwei Bauteilen mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften bestand, durch Funktionsintegration in ein einziges Einzelteil überführt, so kann dies eine größere Dimensionierung des resultierenden Bauteils notwendig machen. Für die Funktionserfüllung kann es dann nötig sein, einen höherwertigen Werkstoff zu verwenden, was eine Kostensteigerung mit sich bringen kann.³⁵

Verringert sich durch Funktionsintegration die Anzahl an Fügepartnern, so reduziert sich damit auch die Anzahl notwendiger Montageoperationen, was insbesondere bei lohnintensiven Fertigungen zu Kostenersparnissen führen kann. In Abbildung 6 sind zwei Konstruktionen eines Schalldämpfers für Pneumatikzylinder dargestellt, in dem die Anzahl an Teilen von sieben auf drei reduziert worden ist.

³³ In Anlehnung an Pahl et al. (2007), S. 372.

³⁴ Vgl. Friedrich et al. (2008), S. 317.

³⁵ Vgl. Ziebart (2012), S. 157 - 165.

Durch die Herstellung des Gehäuses als Spritzgussteil konnte eine montagefreundliche Schnappverbindung realisiert werden, die mit weniger Einzelteilen die Funktion erfüllen kann.³⁶

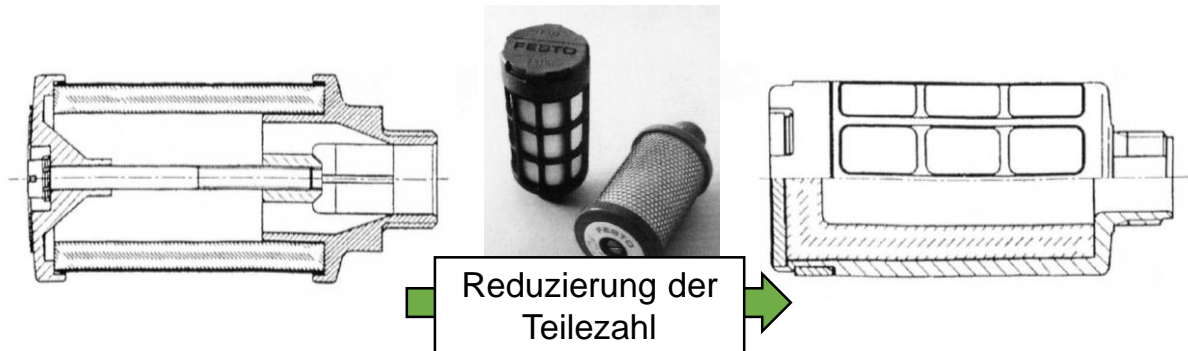


Abbildung 6: Reduzierung der Teilezahl in einem Schalldämpfer³⁷

Wegen des verringerten Materialbedarfs aufgrund wegfallender Fügeelemente hat die Funktionsintegration auch im Leichtbau eine Bedeutung. Sind die entstandenen Bauteile leichter und komplexer in der Gestalt, so vereinfacht das verringerte Gewicht die Montage, während die komplexere Gestalt Verwechslungen bei der Montage vorbeugen kann. Durch Funktionsintegration können auch integrale Anschlagflächen oder Positionierungshilfen eingebracht werden, um die Montierbarkeit zu verbessern.³⁸ Der verringerte Montageaufwand kann damit auch einen verringerten Aufwand in der Qualitätskontrolle zur Folge haben, sowie das Recycling aufgrund eines geringeren Aufwands für die Demontage vereinfachen.³⁹ Insbesondere bei hohen Stückzahlen kann Funktionsintegration also zweckmäßig sein. Grundsätzlich sollte eine Konstruktion an die Stückzahl angepasst werden, in der sie später hergestellt wird.⁴⁰

Häufig ist das Ziel von Funktionsintegration die Kostensenkung. Dabei muss eine erfolgte Funktionsintegration jedoch nicht immer positive Auswirkungen auf die Kosten haben. Weisen die resultierenden Bauteile eine komplizierte Gestalt auf, so kann das zu einem Zuwachs an Bearbeitungsflächen führen. Werden für die

³⁶ Vgl. Kurz et al. (2009), S. 243.

³⁷ In Anlehnung an Kurz et al. (2009), S. 242f.

³⁸ Vgl. Ziebart (2012), S. 167f.

³⁹ Vgl. Kurz et al. (2009), S. 241.

⁴⁰ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 500.

Herstellung Urformverfahren wie Gießen eingesetzt, so hat dies nur einen geringen Einfluss auf die Kosten. Die Kosten spanender Bearbeitungsverfahren sind allerdings stark von der Anzahl zu bearbeitender Flächen abhängig. Auf der anderen Seite ermöglichen ein verringerter Materialbedarf und eine verringerte Anzahl an zu transportierenden, zu lagernden und zu verwaltenden Werkstücken eine Kostensenkung.⁴¹

Weitere Vorteile einer geringen Teilezahl in einem Produkt können ein verringerter Zerspanungsaufwand sowie eine mögliche Erweiterung der Belastungsgrenzen des Produkts aufgrund fehlender Fügestellen sein.⁴² Im Gegensatz zur Integralbauweise kann bei der Differentialbauweise ein Einzelteil in mehrere fertigungstechnisch günstige Werkstücke aufgegliedert werden. Eine verringerte Fertigungsdurchlaufzeit wird dann ermöglicht, wenn die einzelnen Werkstücke in parallel ablaufenden Fertigungsschritten erzeugt werden können. Die Differentialbauweise begünstigt den Einsatz handelsüblicher und günstiger Halbzeuge und Normteile sowie eine Erhöhung der Anzahl gefertigter Gleichteile. Werden Verschleißteile in Differentialbauweise gefertigt, können diese einfacher ausgetauscht werden, was die Instandsetzung erleichtert. Wird durch die Differentialbauweise eine Verringerung der Werkstückabmessungen bewirkt, so geht dies mit einer Erleichterung der nötigen Montage- und Transportprozesse einher.⁴³

Die Auswirkungen der Funktionsintegration sind vielfältiger Natur und führen nicht immer zu einer leistungsfähigeren oder kostengünstigeren Konstruktion. Das Vereinigen verschiedener Funktionen ist herausfordernd, weil einzelne Bauteile hinsichtlich ihrer Geometrie und ihres Werkstoffs nicht mehr nur hinsichtlich einer einzelnen Funktion ausgelegt werden können.

2.2 Methoden und Hilfsmittel zur Funktionsintegration

Die *Grundregeln zur Gestaltung*, *Gestaltungsprinzipien* und *Gestaltungsrichtlinien* stellen etablierte Hilfsmittel im Konstruktionsprozess dar. Die allgemeingültigen Grundregeln der Gestaltung („eindeutig“, „einfach“, „sicher“)⁴⁴ werden durch konkretere Hinweise in den Gestaltungsprinzipien unterstützt, wobei diese aber auch

⁴¹ Vgl. Ziebart (2012), S. 170.

⁴² Vgl. Pahl et al. (2007), S. 450 - 452.

⁴³ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 447.

⁴⁴ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 314 - 352.

als übergeordnet zu verstehen sind.⁴⁵ Für die Funktionsintegration sind insbesondere das Prinzip der Funktionsvereinigung/-trennung⁴⁶, Aufgabenteilung⁴⁷ sowie das Prinzip der Integral-/Differentialbauweise relevant. In diesen Prinzipien sind anhand konkreter Beispiele verschiedene in Abschnitt 2.1.2 genannte Vor- und Nachteile unterschiedlicher Zuordnungen von Funktionen und Bauteilen bzw. Baustrukturen dargestellt. EHRENSPIEL UND MEERKAMM (2013) beschreiben im Prinzip der Integral-/Differentialbauweise⁴⁸ neben verschiedenen Beispielen auch zwei Methoden zur Reduzierung der erforderlichen Teilezahl eines Produkts. Durch die Analyse benachbarter Bauteile soll im Rahmen der Methode „Analyse des Bauteils“ ergründet werden, inwieweit diese Bauteile, beispielsweise durch Änderung des Werkstoffs oder des Fertigungsverfahrens, vereinigt werden können. Bei der Änderung des Fertigungsverfahrens sind hierbei insbesondere Ur- und Umformtechnologien wie Gießen, Sintern, Schmieden oder Blechumformen zu bevorzugen.⁴⁹ Die zweite Methode lautet „Strategie der ‚einteiligen Maschine‘“, in der in einer Maschinenkonstruktion zunächst gedanklich alle Bauteiltrennungen entfernt werden, als würde ein einteiliges Gussteil vorliegen. Anschließend wird das technische System stufenweise wieder in eine minimal notwendige Teilezahl aufgetrennt, die sich beispielsweise aufgrund notwendiger Relativbewegungen oder Zugänglichkeiten für Nutzung und Montage ergibt.⁵⁰

Funktionsintegration bzw. Integral- und Differentialbauweisen werden bei PAHL ET AL. (2007) im Rahmen von Gestaltungsrichtlinien zur fertigungs- und montagegerechten Gestaltung behandelt.⁵¹ In Gestaltungsrichtlinien sind die Erfahrungswerte vergangener Konstruktionsaufgaben zusammengetragen und bewährte Lösungen und Vorgehensweisen dokumentiert. Ihre Vorteile liegen in der praktischen Anwendbarkeit sowie dem intuitiven Verständnis durch den Nutzer; sie können damit vor allem auch unerfahrenen Konstrukteuren helfen.⁵² In der internationalen Literatur werden Gestaltungsrichtlinien auch mit „Design for X“ bezeichnet, wobei das

⁴⁵ Vgl. Schindler (2012), S. 430f.

⁴⁶ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 495 - 498.

⁴⁷ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 366 - 376.

⁴⁸ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 499 - 502.

⁴⁹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 502.

⁵⁰ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 502.

⁵¹ Vgl. Müller (2013), S. 702 - 725; Pahl et al. (2007), S. 445 - 468.

⁵² Vgl. Meerkamm et al. (2012), S. 452.

X jeweils durch eine Hauptforderung, also eine zentrale und entwicklungsbestimmende Forderung an das Gestaltungsvorhaben⁵³, ersetzt wird. Die Forderung nach der Beachtung der Gestaltungsrichtlinien wird auch als Restriktionsgerechtes Gestalten bezeichnet.⁵⁴ Während Gestaltungsprinzipien auch funktionsrelevante Aspekte wie beispielsweise Kraftleitung behandeln⁵⁵, unterstützen Gestaltungsrichtlinien beim Vorgehen für beliebige nicht funktionsrelevante Hauptforderungen. Gestaltungsrichtlinien zeigen Zusammenhänge zwischen bestimmten Anforderungen, wie beispielsweise Anforderungen hinsichtlich Korrosion⁵⁶, Ergonomie⁵⁷ oder Verschleiß⁵⁸, und der Gestaltung des zu entwerfenden Bauteils auf. DfX-Strukturierungsansätze wie von BAUER (2003)⁵⁹ versuchen die Vielzahl an Gestaltungsrichtlinien auf Basis der verfolgten Ziele zu ordnen und damit das Finden zur Aufgabenstellung passender Hinweise zur Gestaltung zu erleichtern.⁶⁰ Hinweise zur Funktionsintegration sind in diesen übergeordneten Zielen wie beispielsweise „Design for Low Effort“ jedoch nur indirekt zu finden. In Gestaltungsrichtlinien wie „Fertigungsgerechtes Gestalten“⁶¹ oder „Blechgerechtes Gestalten“⁶² sind eine Vielzahl an sogenannten Gut/Schlecht-Beispielen aufgeführt, die dabei helfen, Bauteile so zu konstruieren, dass ihre Herstellbarkeit gewährleistet ist. Nicht immer führen die aufgeführten Beispiele allerdings zu einer Kostenersparnis in der Herstellung.⁶³ Die Gültigkeit und der Anwendungsbereich der Gestaltungsrichtlinien ist projektabhängig zu bewerten – die in den Gestaltungsrichtlinien dokumentierten Hinweise zur Gestaltung können sich unter Umständen widersprechen oder unterschiedlichen Forderungen an das Produkt zugeordnet sein.⁶⁴

Gestaltungsrichtlinien und -prinzipien unterstützen die Gestaltung in späten Phasen der Produktentwicklung. Während in Gestaltungsprinzipien funktionsrelevante Aspekte behandelt werden, stellen fertigungsbezogene Gestaltungsrichtlinien un-

⁵³ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 398.

⁵⁴ Vgl. Schindler (2012), S. 434.

⁵⁵ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 354 - 365.

⁵⁶ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 416 - 428.

⁵⁷ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 431 - 437.

⁵⁸ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 416 - 428.

⁵⁹ Vgl. Bauer (2003), S. 3; Bauer (2007), S. 13 - 22.

⁶⁰ Vgl. Meerkamm et al. (2012), S. 447 - 449.

⁶¹ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 445 - 468; Klocke (2013), S. 682 - 696.

⁶² Vgl. Heusel, Bronnhuber (2013), S. 622 - 647.

⁶³ Vgl. Boothroyd et al. (2011), S. 5f.

⁶⁴ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 65 - 67.

abhängig von der Produktfunktion die Herstellbarkeit sicher. Bei fertigungsgetriebenen Entwicklungsprojekten ist jedoch eine frühzeitige Betrachtung sowohl der Funktion als auch der Fertigungstechnologien relevant.⁶⁵ Wie Lösungen entwickelt werden, die die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie umfassend nutzen, wird in diesen Hilfsmitteln nicht behandelt.

Bei ZIEBART (2012) findet sich ein Methodenkatalog mit verschiedenen Methoden aus der Konstruktionsmethodik, die eine Funktionserweiterung, Leistungssteigerung, Teilezahlreduktion, Leichtbau oder eine Kostenreduktion, d.h. also mögliche Auswirkungen von Funktionsintegration zum Ziel haben.⁶⁶ Abbildung 7 zeigt einen Auszug aus diesem Methodenkatalog.

Hauptteil	Bibliographie	Prozess	Konstruktionsaufgabe				
		Ablauf	Ist damit folgendes Ziel zu erreichen?				
Methode	Kürzel	Teilschritte	Funktions- erweiterung / Innovation	Leistungs- steigerung	Teilezahl- reduktion	Bauraum- reduktion	Kosten- senkung
Optimierung der Produktstruktur	(Rodenacker, 1976)	Abstraktion auf Funktionen & Systeme, Verschieben von Funktionen (als Variationstechnik), Integration	Nein	Nein	Ja	Möglich	Ja
Variation Funktionsstruktur	(Füssel, et al., 1999), (Roth, 1985), (Köcher, 1983)	Abstraktion auf Funktionsstruktur, Zuordnung von Fügefunktionen, Variation, Neuauswahl, Umsetzung	Möglich	Ja	Ja	Möglich	Ja
Herstellungsvariation	(Ehrlenspiel, 2009)	Analyse Bauteil, Analyse Umgebung, Analyse Funktionen, Variation Werkstoff, Variation Fertigungsverfahren, Ermittlung Gestaltungspotenzial, Neuauswahl, Umsetzung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Abbildung 7: Auszug aus einem Methodenkatalog zur Funktionsintegration⁶⁷

Der Zugriff auf die unterschiedlichen Methoden erfolgt über ein vorher definiertes Entwicklungsziel. Der Methodenkatalog beinhaltet dabei allgemeingültige und etablierte Methoden, die nicht auf die Funktionsintegration spezialisiert sind, aber durch ihre Umsetzung ähnliche Auswirkungen auf eine Konstruktion hinsichtlich

⁶⁵ Vgl. Tekkaya et al. (2015), S. 648.

⁶⁶ Vgl. Ziebart (2012), S. 122 - 125.

⁶⁷ In Anlehnung an Ziebart (2012), S. 124f.

der oben genannten Entwicklungsziele haben können. Ergänzt wird der Methodenkatalog um eine Sammlung an „integralen Lösungen“⁶⁸ sowie allgemein formulierten Konstruktionsregeln, in denen vor allem Beispiele und Erfahrungen vergangener Konstruktionsaufgaben zusammengefasst sind. Beispielsweise sollen Bauelemente, die keinen Beitrag zur Funktion haben, weggelassen oder Filmgelenke zur Realisierung kleiner und langsamer Bewegungen eingesetzt werden.⁶⁹ Abbildung 8 zeigt einen Auszug aus der Sammlung an Konstruktionsregeln.



Typ	Nr.	Regel	Bilder, Beispiele	Quelle
Allgemeines Vorgehen	1	Für Funktionsintegration Aufgaben wählen, die großen Zeitaufwand zulassen	Funktionsintegrierte Lösungen erfordern größeres konstruktives Wissen	(Roth, 1985)
Allgemeines Vorgehen	2	Für Funktionsintegration Aufgaben wählen, die keine extremen Anforderungen stellen	Funktionsintegration kann zu Kompromissen zwischen Funktionen führen	(Roth, 1985)
Allgemeines Vorgehen	3	Integration von Funktionen, die nur kurzzeitig als Nebenfunktionen auftreten, z.B. Transport, Lagerung, etc	 Kleinteilpositionierung im Spritzgußrahmen	(Roth, 1985)
Allgemeines Vorgehen	4	Mehrfachnutzung von Bauelementen anstreben	 Entriegeln und Öffnen	(Roth, 1985)

Abbildung 8: Auszug aus einem Katalog mit Konstruktionsregeln zur Funktionsintegration⁷⁰

Die verfügbaren Hilfsmittel zur Umsetzung von Funktionsintegration basieren hauptsächlich auf allgemeingültig und abstrakt gehaltenen Hinweisen sowie Beispielen und Gestaltungsvorbildern aus verschiedenen Entwicklungsprojekten. Aspekte der Fertigung werden im Rahmen von DfM-Ansätzen hauptsächlich hinsicht-

⁶⁸ Vgl. Ziebart (2012), S. 235.

⁶⁹ Vgl. Ziebart (2012), S. 236 - 241.

⁷⁰ In Anlehnung an Ziebart (2012), S. 236.

lich der Herstellbarkeit betrachtet und sind daher nicht für eine fertigungsgetriebene Entwicklung geeignet, in der gezielt Möglichkeiten der Fertigungstechnologie zur Funktionsintegration genutzt werden sollen. Die Gestaltungsrichtlinien sind auf konkrete Fertigungstechnologien, wie Gießen oder Spritzgießen, ausgelegt. Auch die in ZIEBART (2012) dokumentierte Sammlung „integraler Lösungen“ führt verschiedene Konstruktionsbeispiele auf, die jedoch auf den jeweiligen Fertigungstechnologien basieren, mit denen die aufgeführten Beispiele erzeugt worden sind. Methoden, mit deren Hilfe ausgehend von einer beliebigen Funktion oder Fertigungstechnologie gezielt und systematisch Funktionsintegration betrieben werden kann, sind in der Literatur nicht zu finden.

2.3 Bedeutung fertigungsgetriebener Ansätze für die Produktinnovation

Eine Methode stellt die Beschreibung eines planmäßigen Vorgehens dar, „nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen“⁷¹. Die Entwicklung von Methoden steht in einem engen Zusammenhang mit Modellen. Modelle sind ein wesentlicher Bestandteil der Produktentwicklung. Mit ihrer Hilfe werden komplexe Problemstellungen zur besseren Handhabung abstrahiert und strukturiert.⁷² Modelle sind dadurch gekennzeichnet, dass sie ein aufgabenspezifisches und zweckgebundenes Abbild der Realität darstellen und damit dabei helfen, das Wesentliche vom Unwesentlichen trennen zu können.⁷³ Damit zeichnen sowohl Modelle als auch Methoden die Zielorientierung aus.⁷⁴ Im besten Fall sind Methoden und Modelle so aufeinander abgestimmt, dass für eine Methode passende Modelle bereitstehen, die genau die Aspekte abbilden, die für eine bestimmte Handlungsanweisung der Methode wesentlich sind. Auch das Ergebnis der jeweiligen Handlungsanweisung kann mithilfe von Modellen abgebildet werden.⁷⁵ Modelle stellen somit die Grundlage für die Entwicklung von Methoden dar. Für die Produktentwicklung sind insbesondere Produktmodelle, Prozessmodelle und ablaforientierte Modelle von Bedeutung.⁷⁶ In Abschnitt 2.3.1 werden

⁷¹ Lindemann (2009), S. 57.

⁷² Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 21.

⁷³ Vgl. Lindemann (2009), S. 11.

⁷⁴ Vgl. Gramlich (2013), S. 13.

⁷⁵ Vgl. Gramlich (2013), S. 13.

⁷⁶ Vgl. Gramlich (2013), S. 12.

Produktmodelle vorgestellt, die kompatibel mit etablierten Produktentwicklungsansätzen mit starkem Fokus auf die Produktfunktion sind, die in Abschnitt 2.3.2 erläutert werden. Die in Abschnitt 2.3.3 vorgestellte Prozess- und Verfahrensmodellierung bildet die Grundlage für fertigungsorientierte Entwicklungsansätze und Methoden (Abschnitt 2.3.4), in denen Fertigungsaspekte in besonderem Umfang berücksichtigt werden.

2.3.1 Eigenschaftsbasierte Modellierung technischer Produkte von der Funktion zur Gestalt

Technische Systeme sind durch eine Systemgrenze von ihrer Umgebung getrennt und setzen sich aus einer beliebigen Menge an Elementen bzw. Teilsystemen zusammen, die über Beziehungen miteinander verknüpft sind. Über Ein- und Ausgangsgrößen steht das technische System mit seiner Umgebung in Verbindung.⁷⁷ Auch technische Produkte können mithilfe des Systembegriffs beschrieben werden. Technische Produkte sind „künstlich erzeugte geometrisch-stoffliche Gebilde“⁷⁸, die aus Elementen bestehen.⁷⁹ Wird die Systemgrenze um eine Baugruppe eines Produkts gelegt, so besteht diese aus verschiedenen Teilsystemen (Einzelteilen), die über Beziehungen (Kopplungen) miteinander verknüpft sind. Diese Baugruppe steht wiederum über seine Ein- und Ausgangsgrößen mit anderen Baugruppen in Verbindung und bildet mit ihnen zusammen das übergeordnete System bzw. Produkt. Die Komplexität eines Systems hängt unter anderem von der Art, Anzahl und Verschiedenartigkeit der im System enthaltenen Elemente sowie ihren Relationen zueinander ab.⁸⁰ Das in Abbildung 4 gezeigte Beispiel der mehrteiligen Deckenleuchte weist hinsichtlich der Teilezahl bzw. Anzahl an Elementen eine höhere Komplexität auf als die Deckenleuchte, in der die Energieleitung gleichzeitig der Befestigung an der Decke dient.

Technische Systeme können mithilfe von Eigenschaften beschrieben werden. Eigenschaften setzen sich zusammen aus einem Merkmal und einem Wert bzw. einer Ausprägung.⁸¹ Während HUBKA (1984) auf Basis der Art ihrer Feststellung zwischen „inneren Eigenschaften“ und „äußeren Eigenschaften“ unterscheidet⁸², ist

⁷⁷ Vgl. Hubka (1984), S. 13 - 15.

⁷⁸ Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 27.

⁷⁹ VDI 2223 (2004), S. 9.

⁸⁰ Vgl. Lindemann (2009), S. 10.

⁸¹ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 30; Lindemann (2009), S. 160.

⁸² Vgl. Hubka (1984), S. 100.

für die Produktentwicklung häufig die Unterscheidung zwischen „unabhängigen Eigenschaften“ und „abhängigen Eigenschaften“ zweckmäßig. Die unabhängigen Eigenschaften lassen sich vom Konstrukteur direkt festlegen und sind somit nicht von anderen Eigenschaften des Produkts abhängig. Abhängige Eigenschaften werden hingegen von den unabhängigen Eigenschaften bedingt und können damit nicht direkt vom Entwickler festgelegt werden.⁸³ Die Kenntnis über die Beziehungen zwischen den Eigenschaften eines Produkts ist daher zentral für die Produktentwicklung. Sie können in sogenannten Eigenschaftsnetzwerken („property-networks“) abgebildet werden.⁸⁴

In Form einer Produktmodellpyramide können Produktmodelle unterschiedlicher Abstraktionsgrade bzw. Konkretisierungsebenen hierarchisch dargestellt werden.⁸⁵ Diese Partialmodelle können auf den unterschiedlichen Konkretisierungsebenen mithilfe verschiedenartiger Eigenschaften beschrieben werden, wie in Abbildung 9 dargestellt.

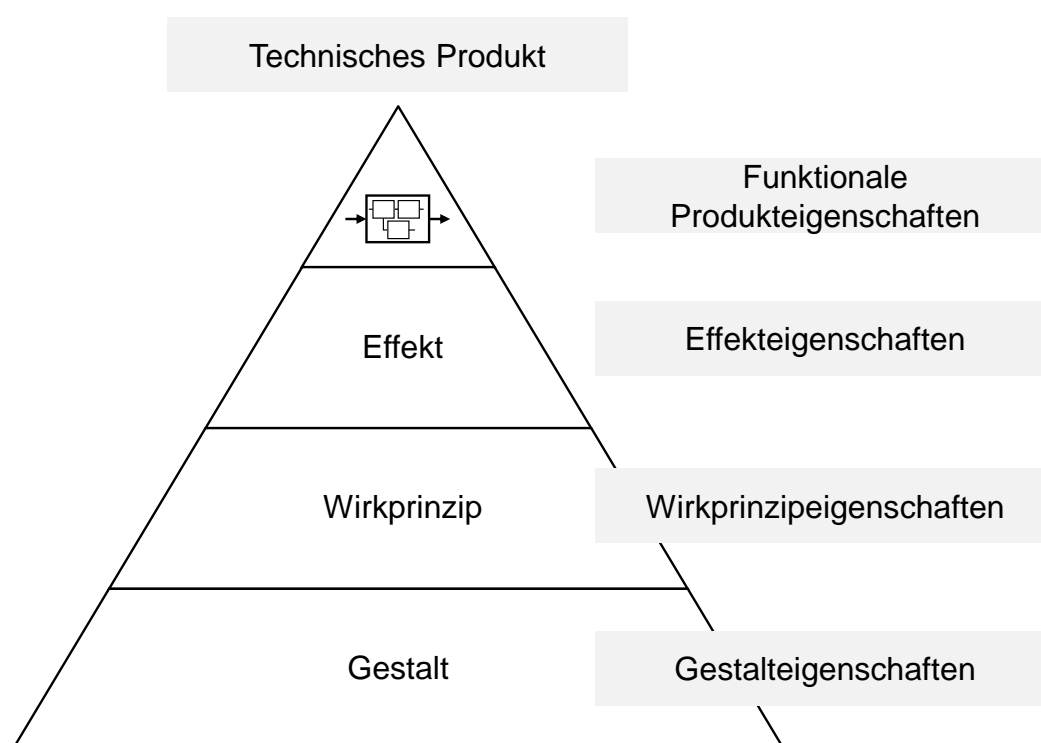


Abbildung 9: Produktmodelleigenschaften in der Produktmodellpyramide⁸⁶

⁸³ Vgl. Birkhofer, Wäldele (2008).

⁸⁴ Vgl. Gramlich et al. (2011), S. 301.

⁸⁵ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 39f.; Sauer (2006), S. 68.

⁸⁶ In Anlehnung an Gramlich (2013), S. 80.

Die in Abbildung 9 dargestellten Partialmodelle und zugehörigen Produktmodelleigenschaften der Produktmodellpyramide korrelieren mit dem Konkretisierungsgrad der Lösung, der während der Entwicklung immer weiter zunimmt.⁸⁷ Abbildung 10 stellt diese zunehmende Konkretisierung am Beispiel eines als Federelement eingesetzten Kragträgers dar.


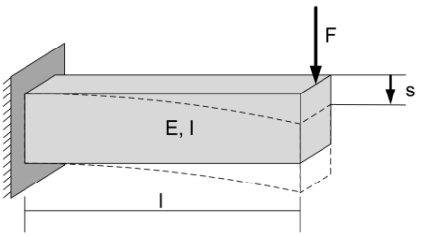
	Modellebene	Produktmodelleigenschaften	
	Produktfunktion	F : Kraft; s : Auslenkung	$s = f(F)$
	Physikalischer Effekt (Federeffekt)	$f(F) = \frac{1}{c}F$ c : Federsteifigkeit	$s = \frac{1}{c}F$
	Wirkprinzip (Balkenbiegung)	 $\frac{1}{c} = \frac{l^3}{3 * EI}$ l : Balkenlänge; E : Elastizitätsmodul; I : Flächenträgheitsmoment	$s = \frac{l^3}{3 * EI}F$
	Produktgestalt (Mehrkammer-profil)	$I = f \left(\begin{array}{l} \text{Kammeranzahl} \\ \text{-anordnung} \\ \text{Abmessungen,} \\ \text{Wanddicke} \end{array} \right)$	$s = f(...)$

Abbildung 10: Produkteigenschaften auf unterschiedlichen Produktmodellebenen⁸⁸

Die *Funktion* des Produkts stellt hierbei die abstrakteste Stufe der Produktmodellierung dar. In der Funktion ist der eigentliche Zweck eines Produkts abgebildet: Die Funktion beschreibt lösungsneutral den gewollten Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgang des Systems mit dem Ziel eine Aufgabe zu erfüllen.⁸⁹ Im Fall des in Abbildung 10 dargestellten Kragträgers ist dies der Zusammenhang zwischen einer eingehenden Kraft und einer daraus resultierenden Auslenkung. Aufgrund der häufig hohen Komplexität technischer Produkte, bietet es sich im Rahmen von Entwicklungsvorhaben an, die Funktion des Produkts in Teilfunktionen zu untergliedern. Für diese weniger komplexen Teilfunktionen können im Rahmen

⁸⁷ Vgl. Wäldele (2012), S. 28ff; Roos (2018), S. 39.

⁸⁸ In Anlehnung an Gramlich (2013), S. 84.

⁸⁹ Vgl. Feldhusen et al. (2013), S. 242.

der Produktentwicklung zielgerichteter Lösungen gefunden werden. In Funktionsstrukturen werden die einzelnen Teilfunktionen über ihre jeweiligen Ein- und Ausgänge miteinander verknüpft, so dass sie im Zusammenspiel die Gesamtfunktion des Produkts erfüllen. Durch die Festlegung der Gesamtfunktion des Produkts spiegelt sich auch der denkbare Nutzen des Produkts wider. Zusätzlich integrierte Funktionen müssen in der Funktionsstruktur berücksichtigt sein. Über die Anzahl notwendiger Bauteile zur Realisierung der in der Funktionsstruktur abgebildeten Funktionen kann an dieser Stelle jedoch noch keine Aussage getroffen werden. So ändert sich an der Funktionsstruktur der in Abbildung 4 dargestellten Deckenleuchte nichts, da sich beide Varianten nur in der Konkretisierung bzw. Realisierung der erfüllten Funktionen unterscheiden. Anders verhält es sich beim Beispiel der in Abbildung 1 dargestellten Linearführung, in die zusätzlich zur Führungsfunktion beispielsweise eine Bremsfunktion integriert ist, die sich auch in der Funktionsstruktur wiederfinden muss. Die Unterscheidung zwischen Haupt- und Nebenfunktionen unterstützt bei der Priorisierung der Entwicklung. Hauptfunktionen tragen unmittelbar zur Gesamtfunktion bei, während Nebenfunktionen unterstützenden bzw. ergänzenden Charakter haben und meist durch die Lösung der Hauptfunktion bedingt sind.⁹⁰

Für die festgelegten Teilfunktionen der Funktionsstruktur werden in folgenden Schritten passende *Effekte* und *Wirkprinzipien* gesucht, mit deren Hilfe die Teilfunktionen realisiert werden können. Als dem Wirkprinzip zugeordneten Wirkort bezeichnet man hierbei denjenigen Ort an dem der physikalische Effekt, wie beispielsweise der Hebeleffekt oder der Reibeffekt, zum Tragen kommt. Im Zusammenspiel mit einer geeigneten Kombination aus Wirkgeometrie, also der Anordnung der Wirkelemente (Wirkflächen, Wirklinien und Wirkräume), einer zugehörigen Wirkbewegung sowie prinzipiellen Eigenschaften des die Wirkflächen realisierenden Werkstoffs, wie zum Beispiel fest, flüssig, elastisch oder zäh, wird die Funktionserfüllung ermöglicht. Wirkflächen werden dabei hinsichtlich ihrer Art, Form, Lage, Größe und Anzahl unterschieden, während Wirkbewegungen analog durch ihre Art (also beispielsweise Translation oder Rotation), Form (gleichförmig oder ungleichförmig), sowie Richtung, Betrag und die Anzahl der Wirkbewegungen charakterisiert werden können.⁹¹ Die Wirkprinzipien, die für die Erfüllung der einzelnen Teilfunktionen eingesetzt werden, werden in einer Wirkstruktur miteinander

⁹⁰ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 45f.

⁹¹ Vgl. Feldhusen et al. (2013), S. 247 - 249.

verknüpft. Die Wirkstruktur kann mithilfe von Struktureigenschaften, die Art, Anzahl und Anordnung der einzelnen Wirkprinzipien charakterisieren, sowie Elementeigenschaften, die den Wirkelementen der Wirkstruktur zugeordnet sind, beschrieben werden. Die Eigenschaften der Wirkelemente, die notwendig sind, um die Produktfunktion durch das gewählte Wirkprinzip zu realisieren, werden als „wirkprinziprelevante Eigenschaften“ bezeichnet.⁹² Im Falle des in Abbildung 10 dargestellten Kragträgers sind dies die Balkenlänge, der Elastizitätsmodul und das Flächenträgheitsmoment, die den zugrundeliegenden Federeffekt, der von der Federsteifigkeit abhängig ist, realisieren. Die tatsächliche Produktgestalt stellt die auf das Wirkprinzip folgende Konkretisierungsstufe dar. In der Produktgestalt sind Geometrie und Werkstoff der Einzelteile, aus denen sich das Produkt zusammensetzt, festgelegt.⁹³ Wird der in Abbildung 10 dargestellte Kragträger in Gestalt eines Mehrkammerprofils, so wie es auch in der in Abbildung 1 dargestellten Linearführung zu finden ist, verwirklicht, so stellen die Anzahl der Kammern, die Wanddicke und Abmessungen wesentliche Gestalteigenschaften dar, die einen direkten Einfluss auf das Wirkprinzip haben. Die wirkprinziprelevanten Eigenschaften müssen durch die gewählte Produktgestalt derart umgesetzt werden, dass das Wirkprinzip realisiert und somit die Produktfunktion erfüllt werden kann. Die Struktureigenschaften Art, Anzahl und Anordnung der Gestaltelemente beschreiben die Baustruktur des Produkts.⁹⁴

2.3.2 Produktentwicklung auf Basis von Modellen

Etablierte Entwicklungsvorgehen weisen Parallelen zum Aufbau der Produktmodellpyramide⁹⁵ auf. Produktentwicklungsansätze wie das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI-Richtlinie 2221⁹⁶ unterstützen bei der schrittweisen Konkretisierung von der Produktfunktion zur Baustruktur. In Abbildung 11 sind darauf aufbauende Phasen eines Produktentwicklungsprozesses dargestellt, ausgehend von einer geklärten Produktidee bis zur abschließenden Produktdokumentation.

⁹² Vgl. Gramlich (2013), S. 85.

⁹³ Vgl. Gramlich (2013), S. 28.

⁹⁴ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 56; Gramlich (2013), S. 80.

⁹⁵ Siehe Abschnitt 2.3.1.

⁹⁶ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 9.

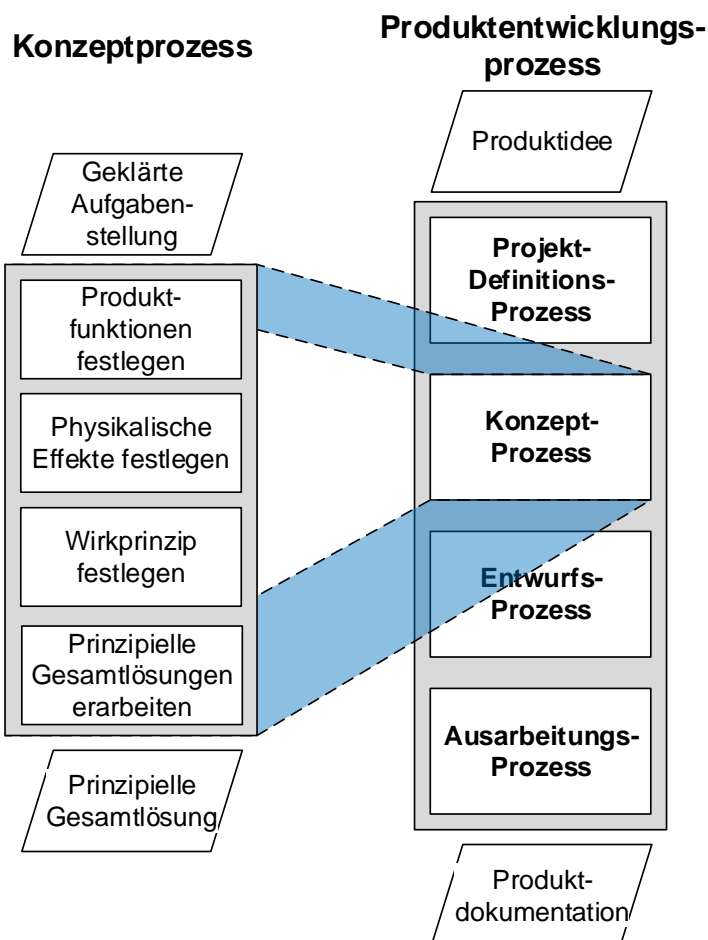


Abbildung 11: Phasen des Produktentwicklungsprozesses⁹⁷

Die Produktfunktionen und eine passende Funktionsstruktur werden im Rahmen des Konzeptprozesses festgelegt. Für diese Funktionen werden anschließend passende physikalische Effekte identifiziert und Wirkprinzipien erarbeitet, die diese realisieren können. Das Ergebnis des Konzeptprozesses ist eine prinzipielle Gesamtlösung, die beispielsweise in Form einer Prinzipskizze die Realisierung der Wirk- und Funktionsstruktur des entwickelten Produkts darstellt.⁹⁸ Im auf den Konzeptprozess folgenden Entwurfsprozess wird der Schritt von einer prinzipiellen Gesamtlösung zur Baustruktur vollzogen, die hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Ansprüche an das Produkt ausgelegt wird. Beim Entwerfen wird das Produkt gestaltet, d. h., ausgehend von der prinzipiellen Gesamtlösung, werden Geometrien und geeignete Werkstoffe festgelegt. Weiterhin werden beim Entwerfen passende Fertigungsverfahren gewählt, Hauptabmessungen des Produkts unter Be-

⁹⁷ In Anlehnung an Birkhofer, Klobardanz (2007), S. 46.

⁹⁸ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 10.

achtung räumlicher Verträglichkeit bestimmt und das Gesamtkonzept durch Teillösungen sich ergebender Nebenfunktionen vervollständigt. Abschließend wird eine wirtschaftliche und technische Bewertung durchgeführt. Neben kreativen Arbeitsschritten prägen den Entwurfsprozess zusätzlich viele korrektive Arbeitsschritte und Iterationen. Jede Festlegung einer Gestaltung kann Einfluss auf andere Gestaltungsbereiche haben, was unter Umständen spätere Anpassungen bereits bearbeiteter Gestaltungsbereiche notwendig macht. Beim Entwerfen wird grundsätzlich vom Qualitativen zum Quantitativen, vom Abstrakten zum Konkreten beziehungsweise von einer grobmaßstäblichen (Grob-)Gestaltung zu einer konkretisierten Feingestaltung vorgegangen. Das Ergebnis des Entwurfsprozesses ist ein maßstäblicher Gesamtentwurf des technischen Produkts.⁹⁹

Von diesem Gesamtentwurf und einer groben Baustruktur ausgehend werden im folgenden Ausarbeitungsprozess Form, Bemessung, Oberflächen und Werkstoff endgültig festgelegt. In der Baustruktur sind die einzelnen Bauteile und Baugruppen des konkreten technischen Systems sowie die zu ihnen gehörenden Verbindungen festgelegt. Die Baustruktur wird dabei so gewählt, dass die zugrundeliegende Wirkstruktur umgesetzt werden kann und das entwickelte technische System auch allen anderen Anforderungen, etwa in Bezug auf Montage, Transport oder Fertigung, gerecht wird.¹⁰⁰

Wie in Abbildung 12 dargestellt, beschreibt die sogenannte Produktarchitektur auf welche Art und Weise eine festgelegte Funktionsstruktur, mit der das technische Produkt aus Sicht der Funktionserfüllung beschrieben werden kann, in eine Baustruktur¹⁰¹, die das technische Produkt anhand seiner stofflichen Gestaltelemente, also Einzelteile und Baugruppen beschreibt, überführt wird.¹⁰²

⁹⁹ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 276f.

¹⁰⁰ Vgl. Feldhusen et al. (2013), S. 251 - 256.

¹⁰¹ In der Literatur wird synonym zur Baustruktur auch der Begriff „Produktstruktur“ verwendet.

¹⁰² Vgl. Förg et al. (2016), S. 101f.

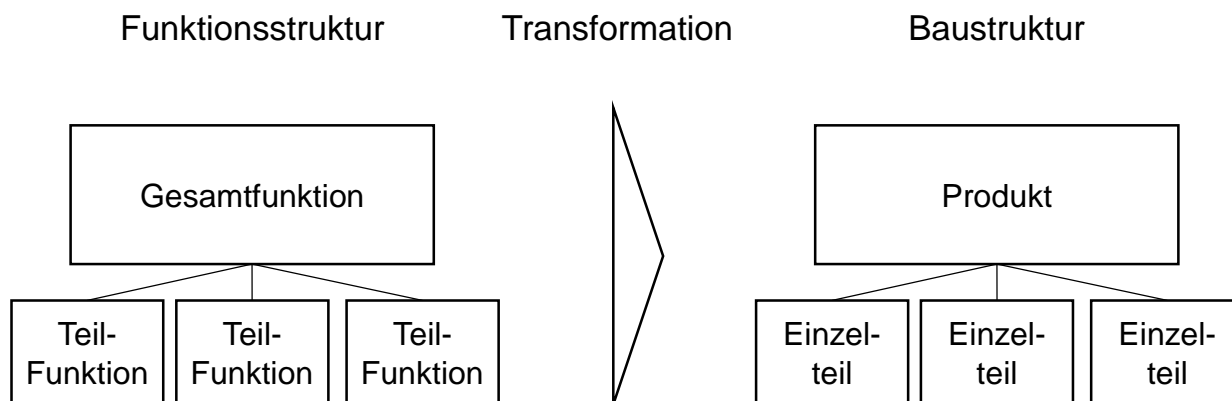


Abbildung 12: Übergang von der Funktionsstruktur in eine Baustruktur¹⁰³

Bei der Definition der Produktarchitektur wird auch festgelegt, welche Bauteile welche Funktionen erfüllen und ob ein Bauteil mehrere Funktionen zugleich erfüllen kann. Damit wird während dieses Schritts eine Entscheidung hinsichtlich der Bauweise getroffen. Bauweisen umfassen „ausgewählte Eigenschaften des Produkts, um sie gegenüber den übrigen Objekteigenschaften hervorzuheben. Bauweisen stellen anerkannte Optima für bestimmte Produktarten dar und repräsentieren den Stand der Technik in bestimmten Branchen“¹⁰⁴. Zu den Bauweisen zählen neben der Integral- und Differentialbauweise unter anderem die Stahl- oder Kunststoffbauweise sowie Guss- und Schweißbauweisen, die hinsichtlich des verwendeten Werkstoffs beziehungsweise des eingesetzten Fertigungsverfahrens unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.¹⁰⁵ Im Kontext der Baustruktur sind die Integral- und Differentialbauweisen von besonderer Bedeutung. Diese Bauweisen unterscheiden sich hinsichtlich der Verbindung der Bauteile des technischen Systems und damit hinsichtlich der Produktarchitektur. Die Integralbauweise ist die Konsequenz daraus, viele Funktionen durch ein einziges Bauteil zu realisieren. Unter Integralbauweise versteht man also die Vereinigung mehrerer Einzelteile zu einem Werkstück aus einheitlichem Werkstoff, so dass keine zusätzlichen Fügeverfahren notwendig werden.¹⁰⁶ Ein Einzelteil kann hierbei eine oder mehrere Funktionen realisieren. Beim Übergang von der Funktionsstruktur zur Baustruktur und damit auch zu einer bestimmten Bauweise spielen *Funktionsträger* eine wesentliche Rolle.

¹⁰³ In Anlehnung an Feldhusen et al. (2013), S. 256.

¹⁰⁴ VDI 2223 (2004), S. 87.

¹⁰⁵ Vgl. VDI 2223 (2004), S. 68; Koller (1998), S. 305.

¹⁰⁶ Vgl. Kurz et al. (2009), S. 241.

Funktionsträger sind technische Gebilde, die eine Funktion erfüllen¹⁰⁷, sie stellen das notwendige Hilfsmittel zur Erfüllung einer oder mehrerer Funktionen dar¹⁰⁸, wie in Abbildung 13 dargestellt.

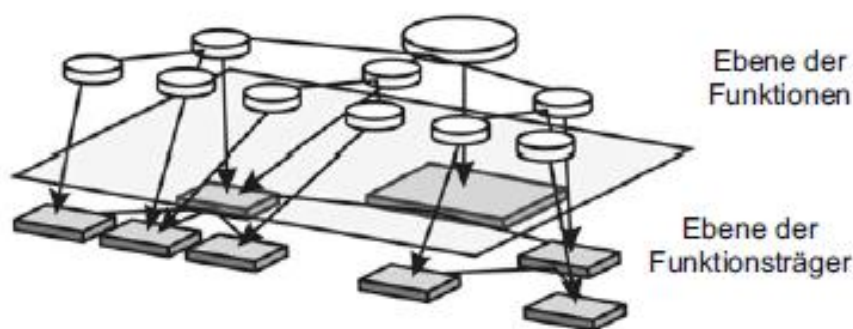


Abbildung 13: Verknüpfung zwischen Funktionen und den sie realisierenden Funktionsträgern¹⁰⁹

In EHRENSPIEL UND MEERKAMM (2013) sind Funktionsträger als „Lösungsprinzip, prinzipielle Lösung, Teil, Teileverband bzw. Baugruppe oder Produkt“¹¹⁰ definiert, die eine oder mehrere Funktionen erfüllen. CONRAD (2013) bezeichnet Funktionsträger als „konstruktive Elemente (Teile, Baugruppen, usw.), die eine Funktion erfüllen“¹¹¹. Der Konkretisierungsgrad eines Funktionsträgers ist damit nicht klar festgelegt und richtet sich nach dem Entwicklungsfortschritt. Eine bei der Festlegung der Funktionsstruktur bereits klare Zuordnung von Funktionsträgern zu Baugruppen und Bauteilen kann durch den Zusammenhang zwischen Funktionsebene und der Ebene der Funktionsträger zwar erahnt werden, ergibt sich im Detail aber erst bei der bewussten Festlegung der Produktarchitektur, wie in Abbildung 12 dargestellt.¹¹²

Die Zuordnung von Funktionen zu Funktionsträgern unterschiedlicher Konkretisierung kann also auf unterschiedliche Art und Weise geschehen und damit auch in unterschiedlichen Bauweisen resultieren.

¹⁰⁷ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 783.

¹⁰⁸ Vgl. Pahl et al. (2013a), S. 341.

¹⁰⁹ Feldhusen et al. (2013), S. 251.

¹¹⁰ Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 745.

¹¹¹ Conrad (2013), S. 193.

¹¹² Vgl. Feldhusen et al. (2013), S. 251.

2.3.3 Prozess- und Verfahrensmodellierung

Den Funktionen, die durch technische Systeme bzw. Produkte erfüllt werden, stehen die technischen Prozesse gegenüber. Technische Prozesse beschreiben eine Zustandsänderung der Elemente eines technischen Systems in einem bestimmten Zeitintervall.¹¹³ Ein technisches Produkt stellt nun das (Arbeits-)Mittel dar, um im Rahmen eines solchen Prozesses diese Zustandsänderung zu bewirken. In HEIDEMANN (2001) werden hierfür die Begriffe *Operator* und *Operand* eingeführt.

Bei der Betrachtung der Produktfunktion agiert das Produkt in seinem Einsatzprozess als aktiver Operator und stellt die Wirkgrößen bereit, mit deren Hilfe im Rahmen eines technischen Prozesses ein Operand im Anfangszustand in seinen Endzustand überführt wird.¹¹⁴ Prozesse können in Teilprozesse untergliedert werden und in Form einer Prozessstruktur abgebildet werden, um auch komplexere Prozesszusammenhänge darstellen zu können.¹¹⁵ Technische Produkte werden meist mithilfe einer Abfolge verschiedener Fertigungsprozesse, die sich zu einer Fertigungsprozesskette zusammensetzen, hergestellt (Abbildung 14).



Abbildung 14: Fertigungsprozesskette zur Fertigung einer geschlossenen Kammer¹¹⁶

In den einzelnen Prozessen der Fertigungsprozesskette fungiert das zu fertigende Produkt als Operand, dessen Endzustand gleichzeitig den Anfangszustand des Folgeprozesses darstellt.¹¹⁷ Mehrkammerprofile, wie sie auch im Beispiel der in Abbildung 1 dargestellten spaltprofilierten Linearführung vorkommen, können in einer kontinuierlichen Fließfertigung realisiert werden, in der ein Blechhalbzeug durch verschiedene Umformprozesse, wie Spaltprofilier- und Walzprofilierprozesse sowie High Speed Cutting (HSC) und Schweißen schrittweise in ein Mehrkammerprofil überführt wird.

¹¹³ Vgl. Gramlich (2013), S. 71.

¹¹⁴ Vgl. Heidemann (2001), S. 88 ff.

¹¹⁵ Vgl. Heidemann (2001), S. 79 - 85.

¹¹⁶ Gramlich (2013), S. 102.

¹¹⁷ Vgl. Gramlich (2013), S. 102.

Technische Prozesse werden mithilfe von *Verfahren* realisiert. In HEIDEMANN (2001) sind Verfahren als Oberbegriff für eine Anzahl von Operationen in einer spezifischen Abfolge definiert, wobei einzelne Operationen wieder aus Teilverfahren zusammengesetzt werden können.¹¹⁸ Das *Verfahrensprinzip* beschreibt die Art und Weise, in der die Zustandsänderung des Operanden abläuft und welcher Wirkzusammenhang zwischen den beteiligten Wirkelementen und Wirkgrößen besteht.¹¹⁹ Während technische Funktionen also mithilfe von Wirkprinzipien realisiert werden, werden analog dazu technische Prozesse durch Verfahrensprinzipien realisiert. GRAMLICH verwendet für die Beschreibung des Arbeitsmittels zur Realisierung technischer Prozesse die Begriffe der verfahrensprinziprelevanten Wirkelemente des Operanden und des Operators. Die verfahrensprinziprelevanten Wirkelemente, die sich aus Wirkflächen, Wirkkörpern, Wirkräumen und relevanten Wirkgrößen zusammensetzen, müssen stofflich, geometrisch und energetisch so verwirklicht sein, dass das dem Prozess zugrundeliegende Verfahrensprinzip ermöglicht wird. Die verfahrensprinziprelevanten Wirkelemente können durch verfahrensprinziprelevante Eigenschaften beschrieben werden.¹²⁰ Dabei können die betrachteten Wirkelemente entweder dem Operator oder dem Operanden, auf den der Operator durch seine Wirkgrößen Einfluss nimmt, zugeordnet sein. Der Operator erwirkt durch diesen Einfluss eine Zustandsänderung des Operanden.¹²¹ Das dem Spaltprofilieren zugrundeliegende Verfahrensprinzip ist in Abbildung 15 dargestellt.

In diesem Prozess agiert die Spaltprofilieranlage als Operator, in dem Spaltwalze und Hilfswalzen die Arbeitsmittel bzw. verfahrensprinziprelevanten Wirkelemente darstellen, mit deren Hilfe der Anfangszustand des Operanden Blechhalbzeug in einen Endzustand überführt wird. Die charakteristischen Flansche werden ausgebildet, in dem die Wirkgröße, die durch die Spaltwalze bewirkte Kraft F , auf die Kante des Blechhalbzeugs wirkt und das durch die Spaltwalze verdrängte Halbzeugvolumen in die Zwischenräume fließen lässt. Die Geometrien und die Steifigkeit der Spalt- und Hilfswalzen sind verfahrensprinziprelevante Eigenschaften des Operators, die Einfluss auf den Prozess haben.

¹¹⁸ Vgl. Heidemann (2001), S. 82.

¹¹⁹ Vgl. Gramlich (2013), S. 87.

¹²⁰ Vgl. Gramlich (2013), S. 87 - 90.

¹²¹ Vgl. Gramlich (2013), S. 87 - 90.

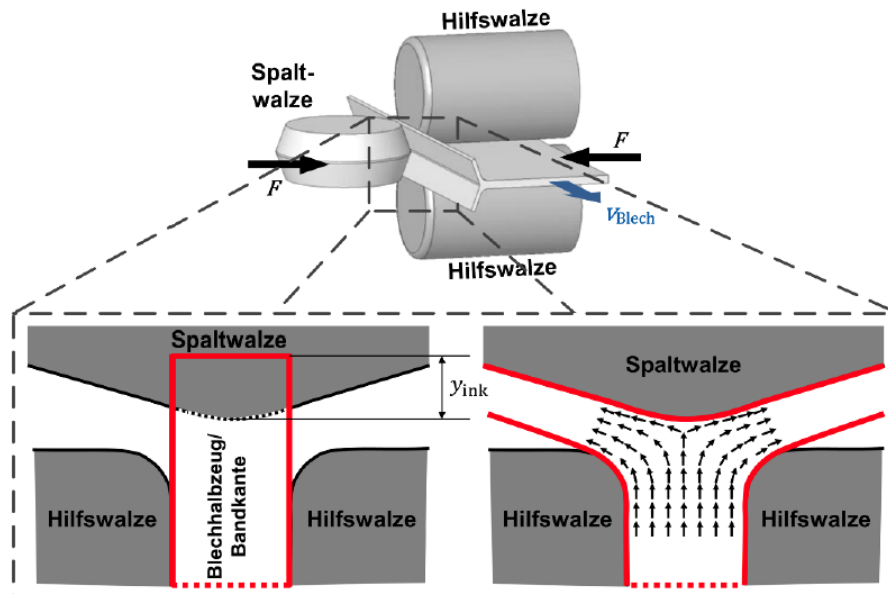


Abbildung 15: Verfahrensprinzip des Spaltprofilierens¹²²

Operanden stellen technische Objekte dar und lassen sich damit sowohl in ihrem Anfangs- als auch in ihrem Endzustand ebenfalls mithilfe von Eigenschaften beschreiben. Im Verfahrensprinzip des Spaltprofilierens sind die verfahrensprinzip-relevanten Eigenschaften des Blechhalbezugs (Operand im Anfangszustand) zum Beispiel eine hohe Festigkeit des Materials sowie eine glatte, gerade und rechtwinklige Bandkante, die die Kompatibilität zu den Wirkelementen des Operators, die Spaltprofilieranlage, in diesem Prozess sicherstellen. Durch einen technischen Prozess wird mindestens eine der Eigenschaften des Operanden im Anfangszustand verändert und in eine Eigenschaft des Operanden im Endzustand überführt.¹²³ *Verfahrensinduzierte Eigenschaften*¹²⁴ sind die charakteristischen Eigenschaften eines Operanden, die sich aufgrund eines bestimmten Verfahrens ergeben haben. Ein Verfahren kann diese Eigenschaften erzeugen, beeinflussen oder verändern. Die verfahrensinduzierten Eigenschaften beschreiben die *verfahrensinduzierten Gestaltelemente*¹²⁵ des Operanden im Endzustand. Verfahrensinduzierte Eigenschaften charakterisieren ein Fertigungsverfahren und bilden die Verknüpfung zwischen der Fertigung und der Produktgestalt formalisiert ab. Dadurch

¹²² Gramlich (2013), S. 88 in Anlehnung an Bruder (2011), S. 16 und Groche et al. (2012b), S. 87.

¹²³ Vgl. Gramlich (2013), S. 64.

¹²⁴ Im Englischen „manufacturing-induced properties“, Vgl. u.a. Groche et al. (2012a), S. 163.

¹²⁵ Im Englischen „manufacturing-induced design elements“

besitzen sie für die Produktentwicklung eine besondere Relevanz.¹²⁶ Im Verfahrensprinzipmodell nach Roos (2018) sind die am Verfahren beteiligten verfahrensprinziprelevanten Wirkelemente des Operanden und Arbeitsmittels sowie die verfahrensprinziprelevanten Wirkgrößen aufgeführt und beschrieben durch welche Wirkzusammenhänge, die mithilfe von Eigenschaftsrelationen und Prozesseigenschaften charakterisiert werden können, die verfahrensinduzierten Gestaltelemente und Eigenschaften entstehen.¹²⁷ Das Verfahrensprinzipmodell erlaubt damit die Identifikation der charakteristischen verfahrensinduzierten Gestaltelemente und Eigenschaften, wie in Abbildung 16 dargestellt.

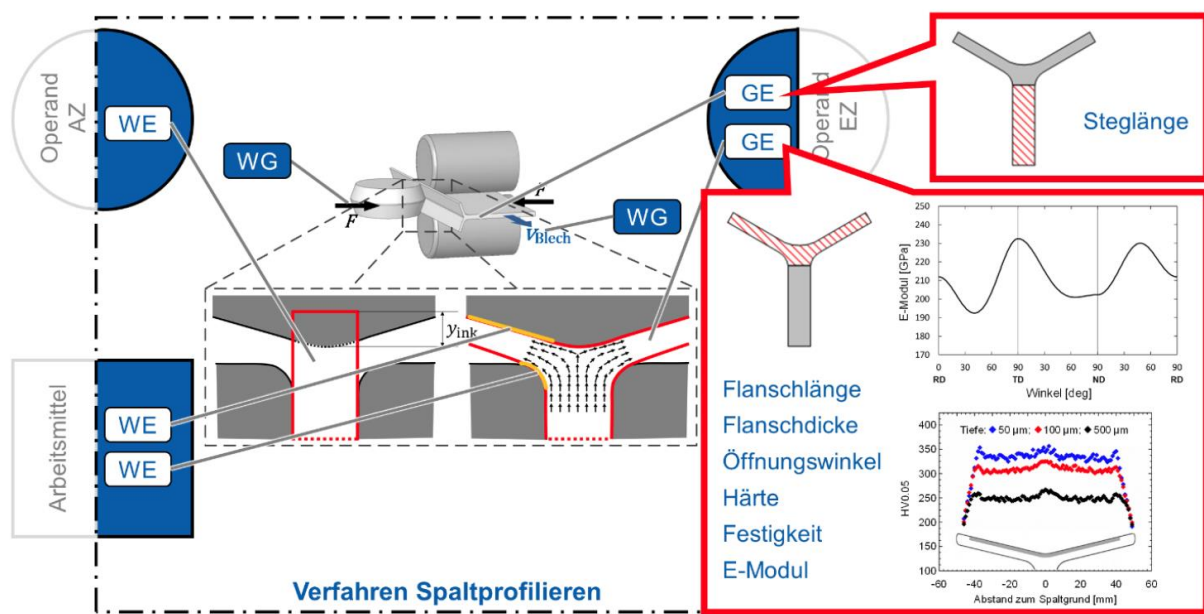


Abbildung 16: Verwendung des Verfahrensprinzip-Modells zur Identifikation verfahrensinduzierter Gestaltelemente und Eigenschaften¹²⁸

Durch das Verfahren Spaltprofilieren ergeben sich zum Beispiel die für dieses Verfahren charakteristischen verfahrensinduzierten Gestaltelemente Flansche und Steg. Diese sind charakterisiert durch ihre verfahrensinduzierten Eigenschaften, wie zum Beispiel Flanschlänge, Flanschdicke und die ultrafeinkörnige Gefügestruktur (UFG) an den Oberflächen der Flansche.¹²⁹ Bei der Fertigung einer

¹²⁶ Vgl. Gramlich (2013), S. 116.

¹²⁷ Vgl. Roos (2018), S. 56 - 67.

¹²⁸ Roos (2018), S. 65, in Auszügen aus Gramlich (2013), S. 88; Ahmels et al. (2017), S. 108, 111.

¹²⁹ Vgl. Gramlich (2013), S. 90f.

Schraube stellt beispielsweise der gewindeartige Materialabtrag an einem Zylinder das fertigungsinduzierte Gestaltelement eines Gewindeschneidprozesses dar. Dieses Gestaltelement kann wiederum über verschiedene Eigenschaften, wie beispielsweise Steigung, Tiefe, Werkstoff und Oberflächenbeschaffenheit beschrieben werden.

Betrachtet man eine Fertigungsverfahrenskette, wie in Abbildung 14 dargestellt, so setzen sich die gefertigten Produkte aus den verfahrensinduzierten Gestaltelementen der einzelnen eingesetzten Fertigungsverfahren zusammen.¹³⁰ Eine Fertigungsverfahrenskette, die sich aus kompatiblen Verfahren zusammensetzt, lässt sich also durch eine Gruppe von verfahrensinduzierten Gestaltelementen und ihren zugehörigen verfahrensinduzierten Eigenschaften charakterisieren, wie in Abbildung 17 dargestellt.

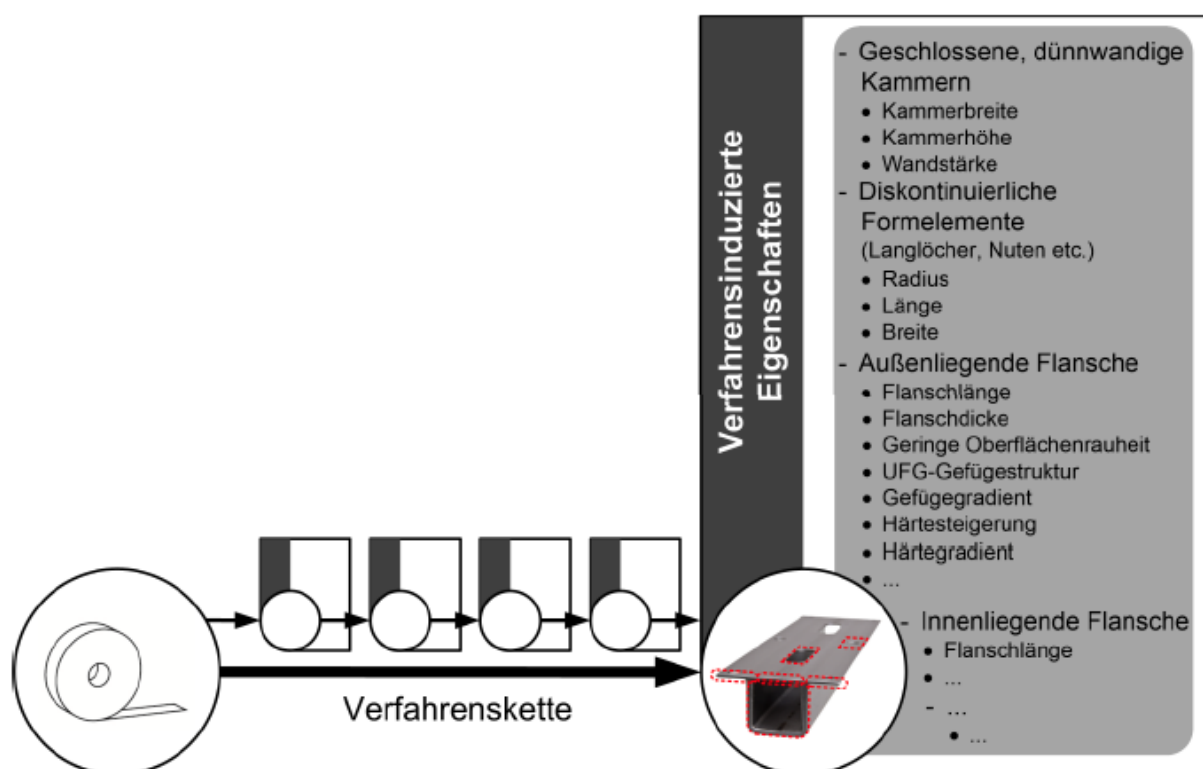


Abbildung 17: Verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Eigenschaften einer Verfahrenskette¹³¹

¹³⁰ Vgl. Gramlich (2013), S. 102.

¹³¹ Gramlich (2013), S. 103.

2.3.4 Vorgehen, Methoden und Hilfsmittel fertigungsintegrierender Produktentwicklungsansätze

Viele etablierte Entwicklungsansätze, wie beispielsweise in der VDI-Richtlinie 2221¹³² beschrieben, stellen schrittweise Vorgehen zur Verfügung, in deren Rahmen ausgehend von einer Produktidee und Marktbedürfnissen Produkte entwickelt werden. Der Schwerpunkt dieser Ansätze liegt damit nicht auf der Unterstützung von technologiegetriebenen Entwicklungsvorhaben.¹³³ Aspekte der Fertigung werden in Form von Gestaltungsrichtlinien hauptsächlich in den späten Phasen der Entwicklung berücksichtigt. Eine Weiterentwicklung des Ansatzes nach VDI-Richtlinie 2221 stellt das Vorgehensmodell der ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung (GPPE) dar. Die GPPE basiert auf einer Modellierung von Produkten und Prozessen und stellt die Prozesskette des Produktlebenslaufs dem Produktentwicklungsprozess in einem gemeinsamen Vorgehensmodell gegenüber. In der Prozesskette Produktentwicklung finden sich die Phasen wieder, die auch in der VDI-Richtlinie 2221 angegeben werden. Die im Rahmen der Produktentwicklung vollständig festgelegten geometrischen und werkstofflichen Eigenschaften des Produkts stellen die Grundlage für die Produktion und damit die physische Realisierung des Produkts dar.¹³⁴ Der Produktlebenslauf stellt die Summe aller Prozesse dar, die ein Produkt in seinem Leben durchläuft.¹³⁵ Er besteht aus den vier Phasen Werkstoffherstellung, Produktion, Nutzung und Recycling/Entsorgung. Die Nutzungsphase nimmt dabei eine Sonderrolle ein, da in dieser Phase das technische Produkt als Arbeitsmittel bzw. Operator der zugrundeliegenden Nutzungsprozesse fungiert. In allen anderen Lebenslaufphasen, wie beispielsweise während seiner Herstellung, ist das Produkt nicht Operator sondern Operand technischer Prozesse.¹³⁶ Kernelemente des Vorgehensmodells der GPPE stellen das Antizipieren und das Beeinflussen dar. Sie verknüpfen die Prozesskette Produktentwicklung und die Prozesskette Produktlebenslauf miteinander.¹³⁷ Beim Antizipieren des Produktlebenslaufs handelt es sich um eine zielgerichtete Prozessanalyse, die auf das jeweilige Konkretisierungsniveau des Entwicklungs-

¹³² Vgl. VDI 2221 (1993), S. 9.

¹³³ Vgl. Tekkaya et al. (2015), S. 647.

¹³⁴ Vgl. Roos (2018), S. 39.

¹³⁵ Vgl. Roos (2018), S. 37.

¹³⁶ Vgl. Birkhofer et al. (2012), S. 564.

¹³⁷ Vgl. Birkhofer et al. (2012), S. 564 - 566.

prozesses abgestimmt ist, das von den bereits getätigten konstruktiven Festlegungen abhängig ist.¹³⁸ Dadurch können im Rahmen der Produktentwicklung Lebenslaufprozesse wie die Produktion bereits vorausgedacht werden und dieses Wissen in konstruktive Entscheidungen im Rahmen der Konkretisierung des Produkts mit einfließen, die wiederum die Lebenslaufprozesse des Produkts beeinflussen.

Auf dem Gedanken der GPPE baut auch der in Abbildung 18 dargestellte weiterentwickelte Ansatz zum *Manufacturing-integrated Design* auf, in dem durch das Antizipieren Produktlebenslaufprozesse mit dem Produktentwicklungsprozess verknüpft werden, der die gezielte Nutzung des Fertigungspotentials zur Generierung optimierter Produktlösungen zum Ziel hat.¹³⁹ Durch eine auf Eigenschaften basierende Formalisierung der Entwicklungsaufgabe ermöglicht ein solcher Ansatz die Entwicklung *fertigungsintegrierender Produktlösungen*, die gegenüber herkömmlichen Lösungen einen erkennbaren Mehrwert bieten, in dem in ihnen Fertigungspotentiale für die Funktionserfüllung umfassend genutzt werden.¹⁴⁰

¹³⁸ Vgl. Roos (2018), S. 80.

¹³⁹ Vgl. Roos et al. (2017c), S. 301ff.

¹⁴⁰ Vgl. Roos et al. (2017a), S. 13; Roos (2018), S. 6.

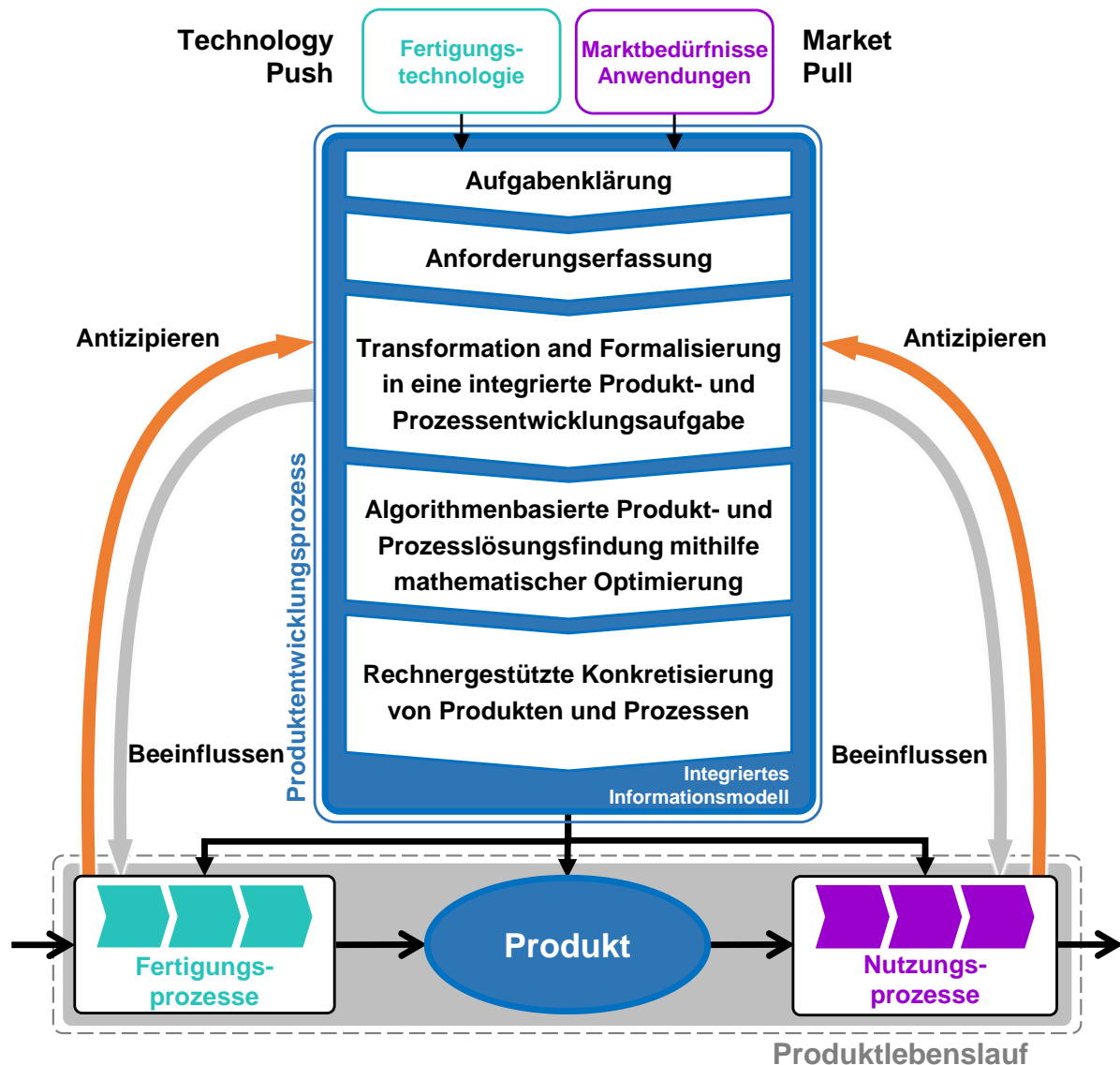


Abbildung 18: Modell des Manufacturing-Integrated Design¹⁴¹

Eine umfassende Produkt- und Prozessmodellierung ist auch Grundlage für die fertigungsintegrierende Entwicklungsmethodik nach GRAMLICH. Durch die Modellierung von Fertigungsverfahren auf Basis von verfahrensinduzierten Eigenschaften und Gestaltelementen werden in diesem Ansatz die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie gezielt für die Produktentwicklung aufbereitet und nutzbar gemacht. Hierfür werden die verfahrensinduzierten Eigenschaften den wirkprinziprelevanten Eigenschaften gegenübergestellt. Dieses *Mapping* der Eigenschaften von verfahrensinduziertem Gestaltelement und Wirkelement erlaubt beispielsweise die Identifikation geeigneter Wirkelemente auf Basis einer untersuchten Fertigungstechnologie, wie in Abbildung 19 dargestellt.

¹⁴¹ In Anlehnung an Roos et al. (2017c), S. 304; Lüthen et al. (2017), S. 149.

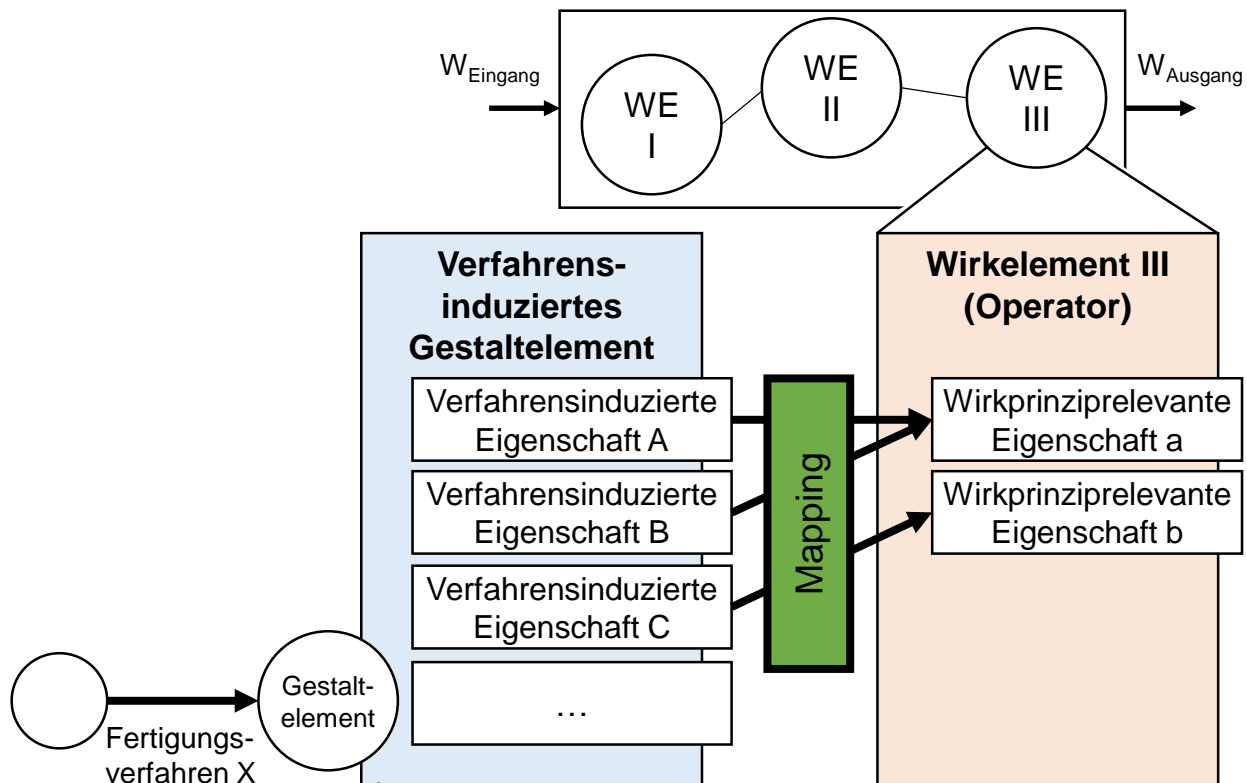


Abbildung 19: Technologiegetriebenes Mapping von verfahrensinduzierten Eigenschaften und wirkprinziprelevanten Eigenschaften nach GRAMLICH¹⁴²

Eine Möglichkeit zur Operationalisierung des Mapping-Ansatzes stellt der Einsatz der sogenannten *Manufacturing-integrated property matrix* dar.¹⁴³ In dieser werden die verfahrensinduzierten Eigenschaften der betrachteten verfahrensinduzierten Gestaltelemente den Eigenschaften ermittelter Funktionsträger in einer Matrix gegenübergestellt. Dadurch lassen sich verfahrensinduzierte Gestaltelemente identifizieren, die grundsätzlich für die Realisierung der Funktionsträger geeignet sind.

Durch die konsistente Modellierung von Prozessen und Produkten auf Basis von Eigenschaften lassen sich die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie für die Produktentwicklung aufbereiten. Insbesondere eine frühzeitige Festlegung der eingesetzten Fertigungstechnologie verspricht, verfahrensinduzierte Eigenschaften gezielt für die Produktgestaltung nutzbar zu machen.¹⁴⁴ Eine systematische Unterstützung der Funktionsintegration ist jedoch noch in keinem der vorgestellten

¹⁴² In Anlehnung an Gramlich (2013), S. 132.

¹⁴³ Vgl. Roos et al. (2017a), S. 12 - 26.

¹⁴⁴ Vgl. Tekkaya et al. (2015), S. 648.

Ansätze gegeben. Dennoch bieten die fertigungsintegrierenden Ansätze durch ihren Bezug sowohl zur Modellierung und Analyse von Fertigungstechnologien auf Basis von Prozessen als auch durch ihren Funktions- bzw. Produktbezug eine wertvolle Grundlage für die Entwicklung von Lösungen, die ausgehend von einer Fertigungstechnologie entwickelt worden sind.

2.4 Fazit des Stands der Forschung

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Definitionen für die Funktionsintegration und Integralbauweise, in denen verschiedene Schwerpunkte zu erkennen sind. Gemein ist ihnen eine grundsätzliche Sicht auf die Anzahl an Einzelteilen, aus der sich die Baustruktur eines Produkts zusammensetzt, und den vom Produkt bereitgestellten Funktionen. Den unterschiedlichen Definitionen liegen jedoch keine an die Funktionsintegration angepassten Modelle zugrunde. Das Fehlen geeigneter Modelle erschwert die Entwicklung von Methoden¹⁴⁵, weswegen sich die Hilfestellungen in der Konstruktionsmethodik derzeit weitgehend auf übergeordnete Methoden, Gestaltungsvorbilder und Richtlinien beschränken. In etablierten Vorgehen der Konstruktionsmethodik wird Funktionsintegration nicht schwerpunktmäßig betrachtet, sondern hauptsächlich im Kontext von Kostenaspekten der Herstellung eines bereits konzipierten Produkts in späten Phasen der Produktentwicklung in Betracht gezogen. Lösungen, die durch Funktionsintegration entstanden sind, können jedoch Vorteile aufweisen, die über eine reine Verringerung der Herstellkosten hinausgehen. Dieses Potential sollte daher bereits bei der Entwicklung von Lösungsprinzipien ausgeschöpft werden, statt erst bei der Anpassung einer Produktgestalt für die Fertigung in späten Phasen der Produktentwicklung. Während DfM-Guidelines und fertigungsbezogene Gestaltungsrichtlinien auf konkrete Fertigungstechnologien bezogen sind, erfolgt der Zugriff auf die von ZIEBART zusammengestellten Methoden über bestimmte übergeordnete Entwicklungsziele. Hilfestellungen, wie ausgehend von beliebigen Fertigungstechnologien systematisch Funktionsintegration für beliebige Funktionen betrieben werden kann und damit die Entwicklung neuartiger und innovativer Produktlösungen ermöglicht, existieren daher noch nicht. Daher ist ein auf die Funktionsintegration spezialisierter Ansatz notwendig, um dieses Potential umfassend ausschöpfen zu können.

Die konsistente Modellierung von Produkten und Prozessen stellt daher eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von Hilfsmitteln zur gezielten Erweiterung des

¹⁴⁵ Vgl. Gramlich (2013), S. 13.

Lösungsraums unter Berücksichtigung der Funktionsintegration dar. Die auf diesen Modellen aufbauenden fertigungsintegrierenden Produktentwicklungsansätze machen das Potential eines Ansatzes deutlich, der die Perspektiven der Fertigung und Produktentwicklung miteinander verknüpfen kann und bei dem frühzeitig eine Festlegung der Fertigungstechnologie vorgenommen wird. Ein operationalisierter Ansatz für die Funktionsintegration ist in diesen jedoch nicht zu finden. Vom Produktentwickler sollte die Fertigung nicht nur hinsichtlich der Herstellbarkeit des gestalteten Produkts betrachtet werden. Stattdessen verspricht das gezielte Nutzen fertigungstechnologischer Möglichkeiten zur Produktgestaltung ein großes Potential, innovative Produkte zu entwickeln.

3 Idee einer fertigungsgetriebenen Funktionsintegration

Die in Abschnitt 2.1.1 aufgeführten Definitionen der Funktionsintegration machen deutlich, dass eine differenzierte Betrachtung des Begriffs notwendig ist, um alle wesentlichen Aspekte fassen zu können. Eine reine Fokussierung auf die funktionalen Bestandteile wird dem Begriff allerdings genauso wenig gerecht wie eine reine Sicht auf die Einzelteile, wie in vielen Definitionen der Integralbauweise. Beide Bestandteile lassen sich nicht voneinander trennen, da auch bei einer in Integralbauweise ausgeführten Lösung alle Funktionen des Produkts erfüllt sein müssen. Ohne Kenntnis der sich ergebenden Gestalt und Baustruktur kann Funktionsintegration ebenso wenig erfasst werden. Wie anhand Abbildung 12 zu sehen ist, findet die Funktionsintegration zwischen der Funktionsstruktur und der Baustruktur statt. Funktionsintegration stellt also einen konstruktiven Vorgang dar, der Fragestellungen von der Funktionsstruktur bis zur Festlegung der Baustruktur und Detaillierung der Einzelteile umfasst. Hierbei stellen die eingesetzten Fertigungstechnologien das Bindeglied zwischen der Funktions- und Baustruktur dar, wie in Abbildung 20 dargestellt.

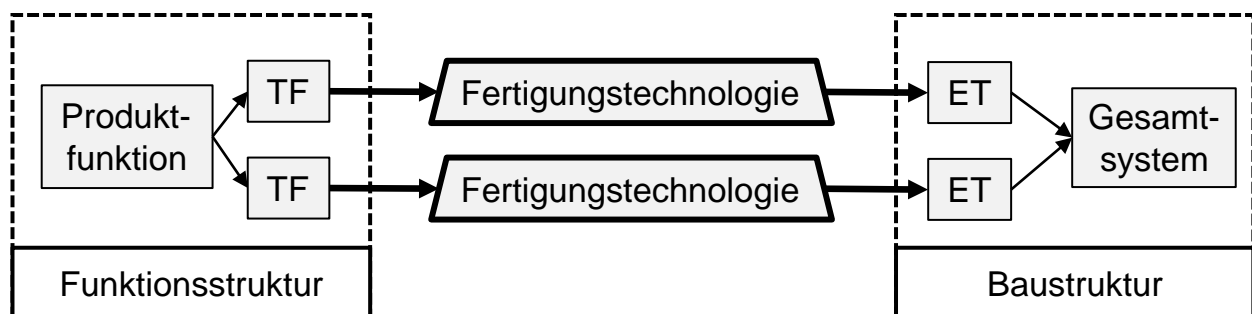


Abbildung 20: Von der Funktionsstruktur zur Baustruktur

In der Funktionsstruktur des Produkts wird die Gesamtfunktion in einzelne Teilfunktionen (TF in Abbildung 20) gegliedert, während die Baustruktur durch die Gestaltung der Einzelteile (ET in Abbildung 20) bestimmt ist, die nach ihrer Herstellung durch Fügeoperationen zum Gesamtsystem zusammengesetzt werden. Mithilfe der eingesetzten Fertigungstechnologien muss eine Produktgestalt herstellbar sein, die in der Lage ist, die geforderten Produktfunktionen zu erfüllen. In fertigungsintegrierenden Ansätzen¹⁴⁶ werden hierbei Lösungen entwickelt, die nicht

¹⁴⁶ Siehe Abschnitt 2.3.4.

nur die grundsätzliche Herstellbarkeit des Produkts gewährleisten, sondern gleichzeitig gezielt fertigungsspezifische Gestaltungsmöglichkeiten zur Funktionserfüllung nutzen. Gleichzeitig ist die Fertigungstechnologie verantwortlich für die physische Realisierung des Produkts, das sich, je nach festgelegter Baustruktur, aus unterschiedlichen Einzelteilen zusammensetzt. Im Rahmen der Produktentwicklung müssen diese Einzelteile gestaltet und im Rahmen der Bildung einer Produktarchitektur zu einem Gesamtsystem zusammengefügt werden. Die vom Produkt bereitgestellten Produktfunktionen tragen in Abhängigkeit vom jeweiligen Zweck des Produkts zum Kundennutzen bei und erlauben den Einsatz des Produkts in bestimmten Anwendungsszenarien.

Im Folgenden wird der in Abbildung 20 dargestellte Weg von der Produktfunktion zur Gestaltung der Einzelteile unter besonderer Berücksichtigung der Fertigungstechnologie hinsichtlich dreier Aspekte differenziert betrachtet, um den Begriff der Funktionsintegration unter Fertigungsgesichtspunkten besser fassen zu können: Die Anzahl an realisierten Funktionen durch das Produkt, die Anzahl der zur Herstellung notwendigen Fertigungstechnologien sowie die Menge an Einzelteilen, aus denen sich die Baustruktur zusammensetzt. In Kombination ergeben die Ausprägungen dieser drei Aspekte den *Integrationsgrad*, wie in Abbildung 21 dargestellt.

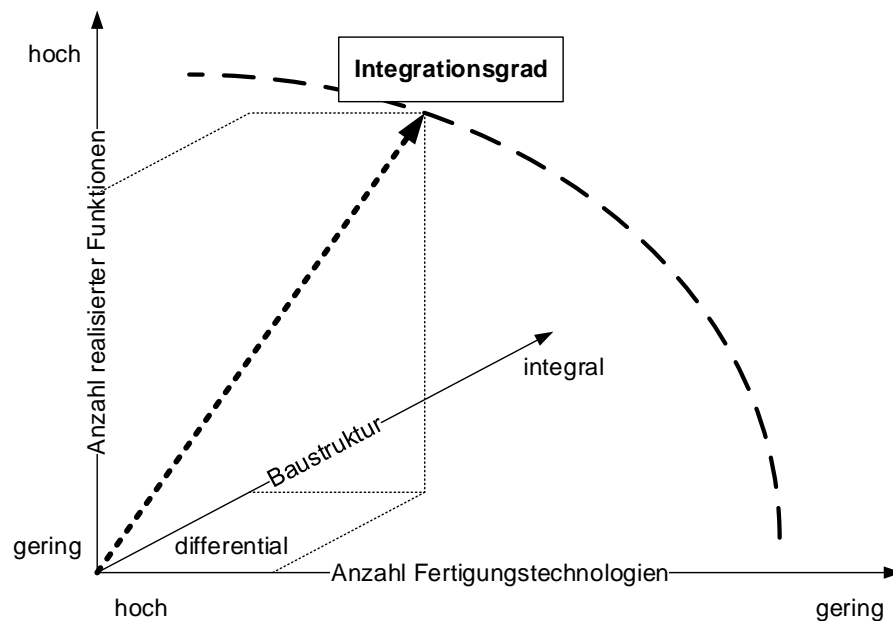


Abbildung 21: Integrationsgrad¹⁴⁷

¹⁴⁷ In Anlehnung an Wagner et al. (2017), S. 281.

Die drei in Abbildung 21 dargestellten Dimensionen des Integrationsgrads können in verschiedenen Lösungen in unterschiedlichem Ausmaß umgesetzt sein. Unter Funktionsintegration im Rahmen einer fertigungsgetriebenen Produktentwicklung soll daher ein konstruktiver Vorgang verstanden werden, mit dessen Hilfe *integrierte Lösungen* generiert werden, die im Vergleich zu einer Referenzlösung einen höheren Integrationsgrad aufweisen, indem sie

- für die gleiche Funktionserfüllung eine geringere Anzahl physischer Einzelteile benötigen (Erhöhung des Grads an integraler Baustruktur), oder
- zusätzliche Funktionen realisieren, indem die Gestaltungsmöglichkeiten bereits eingesetzter Fertigungstechnologien umfassender ausgeschöpft werden (Erhöhung des Grads an Funktionserweiterung), oder
- eine geringere Anzahl an Fertigungstechnologien benötigen, um die für die Funktionserfüllung notwendigen Funktionsträger herstellen zu können (Erhöhung des Grads an Technologieintegration), oder
- eine Kombination aus zwei oder drei der oben genannten Auswirkungen auszeichnet.

Der Integrationsgrad erfüllt dabei seinen Zweck nicht als Absolutmaß, sondern muss immer im Vergleich zu einer Referenz angesehen werden. Ziel des Ansatzes zur fertigungsgetriebenen Funktionsintegration ist die Entwicklung von neuen Lösungen, die sich durch einen *gesteigerten* Integrationsgrad im Vergleich zu einer Referenz auszeichnen.

So gibt es beispielsweise hinsichtlich der Baustruktur unterschiedliche Abstufungen. Produkte können aus einer Vielzahl an Einzelteilen bestehen oder sie können eine Baustruktur aufweisen, die nur ein einziges Einzelteil vorsieht, das in der Lage ist, die gesamte Produktfunktion zu erfüllen. Analog gibt es auch hinsichtlich der Anzahl eingesetzter Fertigungstechnologien und der Anzahl realisierter Funktionen unterschiedliche Abstufungen. Der Integrationsgrad einer entwickelten Lösung kann durch eine gezielte Betrachtung der einzelnen Aspekte schrittweise gesteigert werden. Aus den einzelnen Dimensionen des Integrationsgrads lassen sich drei Integrationsarten ableiten, die eine Erhöhung des Integrationsgrads zur Folge hätten: *Funktionserweiterung*, *Technologieintegration* und *Entwicklung einer integralen Baustruktur*. Durch eine fertigungsgetriebene Funktionsintegration soll der entwickelte Lösungsraum um zusätzliche Lösungen erweitert werden, in denen diese Integrationsarten gezielt umgesetzt worden sind.

Abbildung 22 zeigt die *Funktionserweiterung*, für die eine Betrachtung der Funktionsstruktur einer bestehenden Lösung den Ausgangspunkt zur Steigerung des Integrationsgrads darstellt.

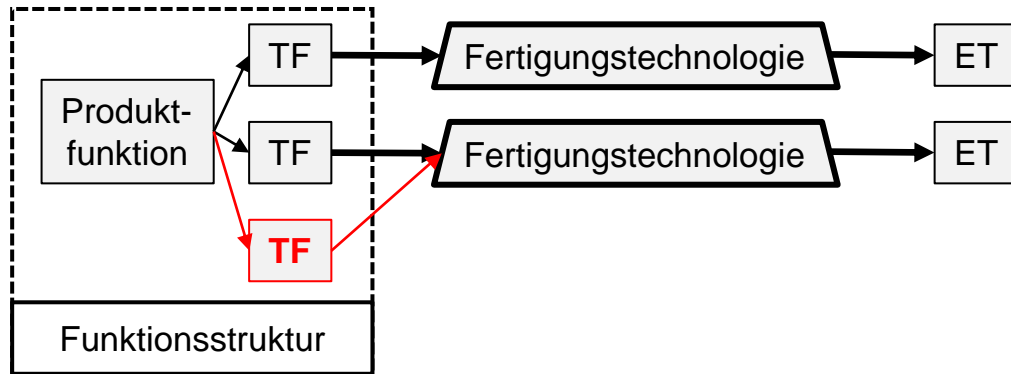


Abbildung 22: Funktionserweiterung

Eine Funktionserweiterung stellt die Erhöhung der Anzahl der durch das Produkt bereitgestellten Funktionen dar, die durch den Einsatz bereits für die Realisierung des Produkts notwendiger Fertigungstechnologien möglich ist, ohne die Anzahl notwendiger Einzelteile zu erhöhen. Damit unterscheidet sich eine Funktionserweiterung, die darauf abzielt, vorhandene Gestaltungsmöglichkeiten, die durch eine Fertigungstechnologie bereitgestellt wird, auszuschöpfen, von einer *Funktionsanreicherung*. Bei einer Funktionsanreicherung werden zusätzliche Funktionen durch das Hinzufügen weiterer Bauteile realisiert, die unter Umständen mithilfe zusätzlicher Fertigungstechnologien hergestellt werden müssen oder als Zukaufteile ergänzt werden. Eine gesteigerte Anzahl an realisierten Funktionen durch eine Lösung kann zu einer Erhöhung der Produktqualität und des Kundennutzens führen, indem beispielsweise zusätzliche Funktionen zur Kompensation von Störeffekten integriert werden¹⁴⁸ oder durch die zusätzlichen Funktionen überhaupt erst neue Anwendungsszenarien durch das Produkt erschlossen werden. Eine Lösung, die durch Funktionserweiterung entstanden ist, zielt also auf eine Erhöhung des Kundennutzens ab und nutzt dabei bereits vorhandene fertigungstechnologiespezifische Gestaltungsmöglichkeiten, um den Herstelleraufwand möglichst nicht zu erhöhen.

¹⁴⁸ Siehe Abschnitt 2.1.2.

Abbildung 24 zeigt die Technologieintegration, bei der die umfassende Nutzung der eingesetzten Fertigungstechnologien zur Realisierung der Produktfunktion im Mittelpunkt steht.

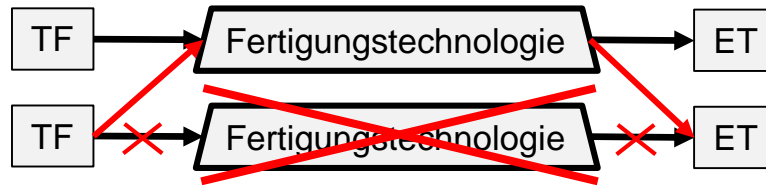


Abbildung 24: Technologieintegration

Durch eine Technologieintegration verringert sich die Anzahl eingesetzter Fertigungstechnologien, ohne dass diese Reduktion einen Einfluss auf die vom Produkt bereitgestellten Funktionen hat. Die Möglichkeiten der verbliebenen Fertigungstechnologien werden umfassender ausgeschöpft, da diese Technologien nun auch Aufgaben einer gestrichenen Fertigungstechnologie im Herstellungsprozess übernehmen müssen. Auf die Anzahl der realisierten Einzelteile hat eine Technologieintegration nicht zwangsläufig Einfluss. Besonders gewinnbringend hinsichtlich einer Aufwandsverringerung ist die Technologieintegration, wenn durch sie Fertigungstechnologien wegfallen, die kosteneffizienten Fertigungsprozessen, wie einer kontinuierlichen Fließfertigung, vor- oder nachgelagert sind.¹⁵³ Neben einer potentiellen Senkung des Herstellaufwands stellt eine Verringerung der Anzahl eingesetzter Fertigungstechnologien einen Indikator dafür dar, in welchem Umfang technologiespezifische Möglichkeiten zur Gestaltung umgesetzt worden sind. Genau wie in fertigungsintegrierenden Ansätzen¹⁵⁴, steht im Rahmen einer fertigungsgetriebenen Funktionsintegration die umfassende Ausschöpfung fertigungstechnologischer Möglichkeiten zur Gestaltung und Realisierung von Produktfunktionen anstatt der reinen Betrachtung fertigungstechnologiespezifischer Restriktionen im Vordergrund.

Die eingesetzten Fertigungstechnologien stellen für alle drei Aspekte des Integrationsgrads ein zentrales Element dar. Durch die frühzeitige Festlegung der Fertigungstechnologie können technologiespezifische Möglichkeiten zur Gestaltung von Produktlösungen, die sich durch einen hohen Integrationsgrad auszeichnen, gezielt genutzt werden. Eine gezielte Unterstützung der drei Integrationsstrategien

¹⁵³ Vgl. Wagner et al. (2014), S. 364; Karin et al. (2014), S. 124.

¹⁵⁴ Siehe Abschnitt 2.3.4.

für beliebige Fertigungstechnologien erfordert daher kompatible Modelle, mit deren Hilfe zugleich die Möglichkeiten der Fertigungstechnologien beschrieben werden können wie auch Aspekte der Produktfunktion und Baustruktur. Auf Basis von Eigenschaften werden im folgenden Kapitel Modelle vorgestellt, mit deren Hilfe sich die Dimensionen des Integrationsgrads in einer gemeinsamen Modellwelt verorten lassen. Ausgehend von dieser Modellierung können Strategien und Hilfsmittel entwickelt werden, mit deren Hilfe der Lösungsraum gezielt um Lösungen erweitert werden kann, die sich durch einen hohen Integrationsgrad und damit zugleich hohes Innovationspotential auszeichnen. Gleichzeitig ist der Integrationsgrad allerdings nur ein Indikator und keine Garantie für eine innovative Lösung. Unter Berücksichtigung des konkreten Entwicklungsprojekts bedarf es einer Beurteilung aller Lösungen, um ihre Zielerfüllung und den Nutzen für die beteiligten Stakeholder aufzeigen zu können. Lösungen mit hohem Integrationsgrad weisen jedoch die genannten Tendenzen hinsichtlich verringerter Herstellkosten und verringerten Montageaufwands und höheren Kundennutzens durch zusätzliche Funktionserfüllung auf, die keineswegs unberücksichtigt bleiben sollten. Aus diesem Grund sollte der um Lösungen mit hohem Integrationsgrad erweiterte Lösungsraum stets in die Lösungsfindung mit einbezogen werden.

Abbildung 25 zeigt ein Beispiel für zwei Lösungen für eine Deckenaufhängung, die sich in allen drei Dimensionen des Integrationsgrads unterscheiden.

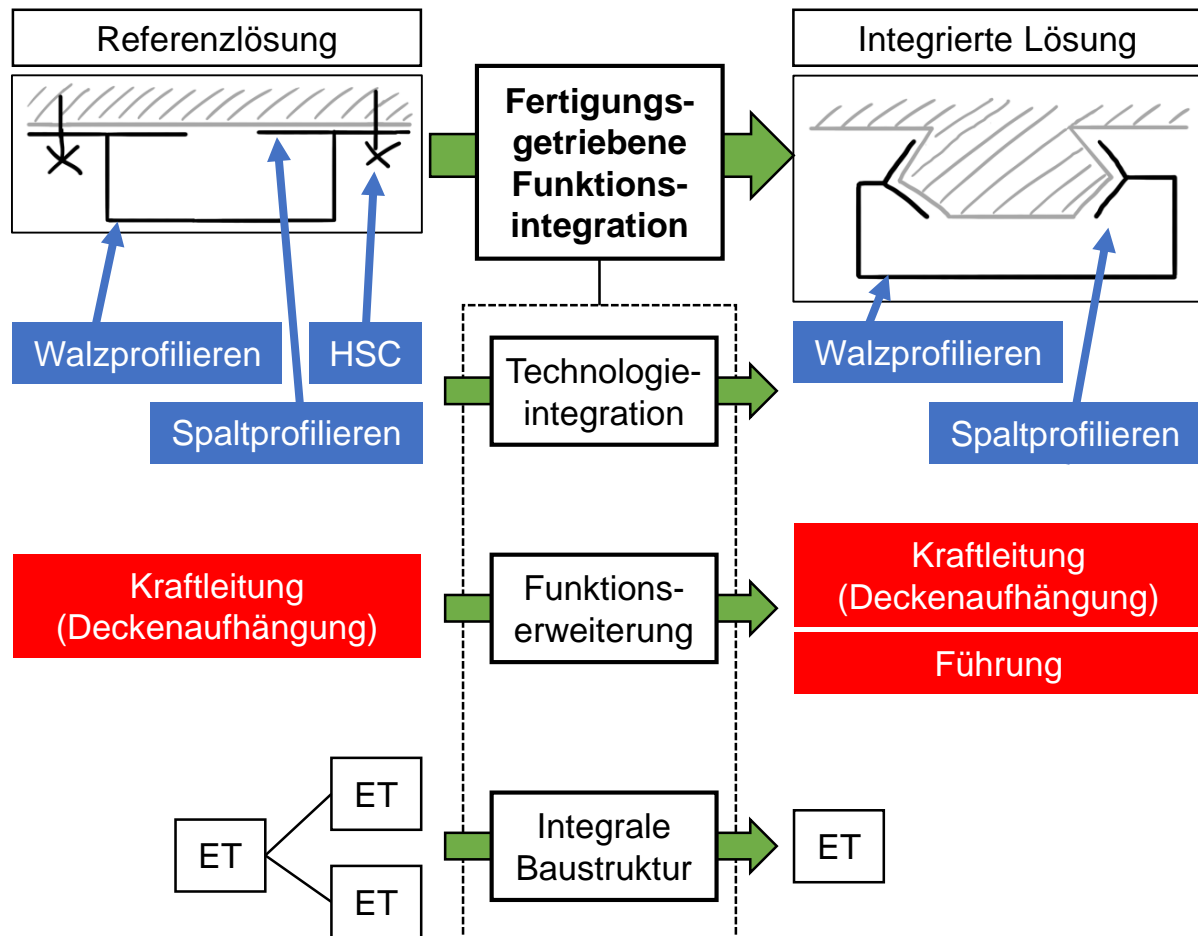


Abbildung 25: Beispiel für die fertigungsgetriebene Funktionsintegration

In der in Abbildung 25 links dargestellten Referenzlösung wird die Deckenaufhängung durch ein spaltprofiliertes Blech realisiert, aus dem durch einen anschließende Walzprofilierprozess eine U-Form gebildet wurde. Mithilfe von Bohrungen (HSC-Formelement) und zusätzlichen Schrauben lässt sich das Profil an der Umgebungsstruktur befestigen. Die Geometrie der in Abbildung 25 rechts dargestellten integrierten Lösung lässt sich mithilfe nur des Spalt- und Walzprofilierens herstellen. Für die Realisierung der Kraftleitungsfunktion ist in dieser Lösung in Form einer Schnappverbindung ein anderes Wirkprinzip umgesetzt, das keine zusätzlichen Bohrungen und Schrauben notwendig macht. Dadurch sind in dieser Lösung im Vergleich zur Referenz eine integrale Baustruktur und eine Technologieintegration umgesetzt. Durch die fehlende Verschraubung lässt sich die Deckenaufhängung geführt durch den spaltprofilierten Flansch, der bereits die Schnappverbindung realisiert, relativ zur Umgebungsstruktur linear bewegen. Die Ergänzung dieser Führungsfunktion stellt die Umsetzung einer Funktionserweiterung dar.

4 Modelle und Hilfsmittel zur fertigungsgetriebenen Funktionsintegration

Ausgehend von der in Kapitel 3 vorgestellten Idee der fertigungsgetriebenen Funktionsintegration werden in diesem Kapitel geeignete Modelle und Hilfsmittel vorgestellt. Die Fertigung spielt für die Funktionsintegration eine große Rolle, weswegen gleichermaßen Funktions- als auch fertigungstechnologische Aspekte betrachtet werden müssen. In Abschnitt 4.1 werden auf geeigneten Modellen basierende Strategien vorgestellt, mit deren Hilfe die Perspektiven der Funktionserfüllung, der Baustruktur und der Fertigungstechnologie im Rahmen der fertigungsgetriebenen Funktionsintegration gezielt zur Erweiterung des Lösungsraums berücksichtigt werden können. Abschnitt 4.2 zeigt auf, wie diese Strategien in einem geeigneten Entwicklungsansatz unter Berücksichtigung relevanter Lebenslaufprozesse umgesetzt werden können. Abschnitt 4.3 behandelt dazu passende Werkzeuge und Hilfsmittel sowie Möglichkeiten, die gewonnenen Erkenntnisse auch für Folgeprojekte nutzbar zu machen.

4.1 Grundlegende Modelle zur Berücksichtigung von Fertigung und Funktion im Rahmen der Funktionsintegration

Funktionsträger stellen die Verknüpfung zwischen der Funktionsstruktur und der Baustruktur eines Produkts dar.¹⁵⁵ In Verbindung mit einer eigenschaftsbasierten Beschreibung sind Funktionsträger damit ein wesentliches Modellelement für die Beschreibung der Funktionsintegration im Rahmen einer fertigungsgetriebenen Entwicklung.¹⁵⁶ Funktionsträger sind konstruktionsbestimmende Elemente, die einer Funktion oder Teilfunktion zugeordnet sind, und können mithilfe unabhängiger und abhängiger Eigenschaften beschrieben werden.¹⁵⁷ Dabei können für verschiedene Konkretisierungsebenen der Produktmodellpyramide¹⁵⁸ Funktionsträger (FT in Abbildung 26) mit jeweils zu dieser Konkretisierungsebene passenden *funktionsrelevanten Eigenschaften* definiert werden, wie in Abbildung 26 dargestellt. Funktionsträger können damit physische Einzelteile bzw. Bauteile¹⁵⁹, aber auch

¹⁵⁵ Siehe Abschnitt 2.3.2.

¹⁵⁶ Vgl. Wagner et al. (2016), S. 742.

¹⁵⁷ Vgl. Roos (2018), S. 27.

¹⁵⁸ Siehe Abschnitt 2.3.2.

¹⁵⁹ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 113.

beispielsweise Lösungsprinzipien¹⁶⁰ auf Wirkprinzipecbene sein. Damit können Funktionsträger aus verschiedenen Quellen stammen, wie beispielsweise aus Lösungssammlungen, der Analyse existierender Produkte oder den Ergebnissen eines Lösungsfindungsprozesses im Rahmen der Konzeptphase. Je nach Konkretisierungsgrad sind Funktionsträger also Elemente, die nicht zwangsläufig ausgehend von einer vorher festgelegten Fertigungstechnologie ausgestaltet wurden.¹⁶¹

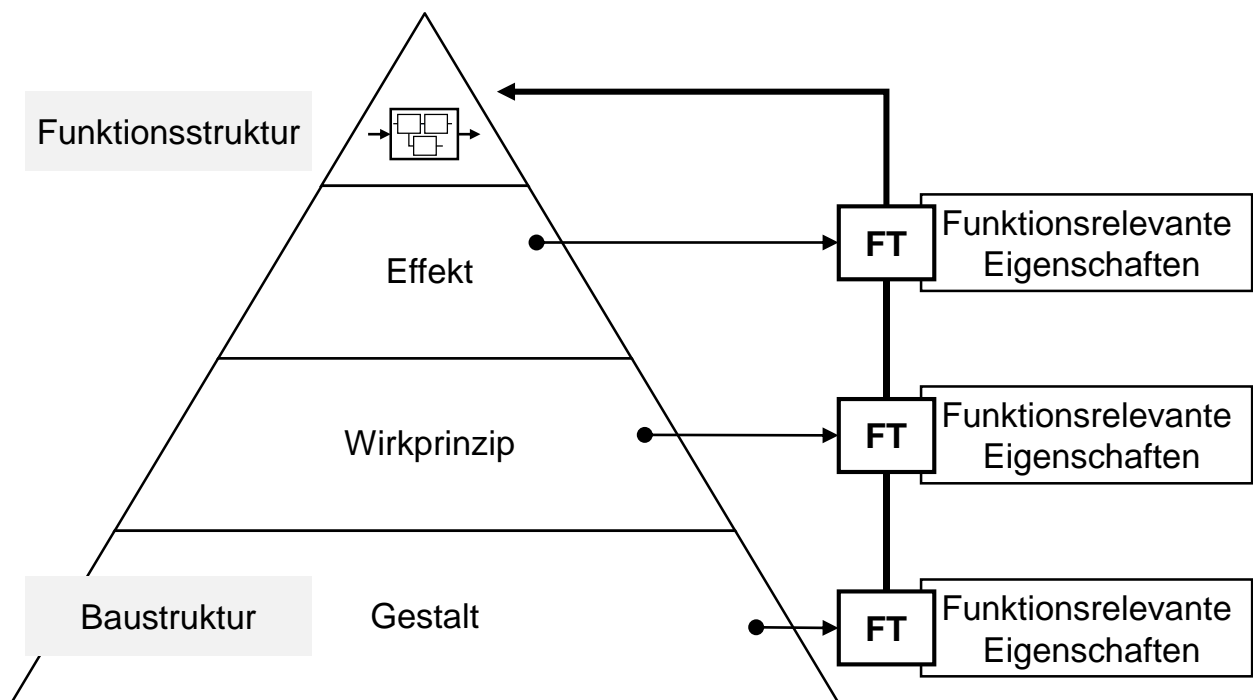


Abbildung 26: Funktionsträger auf unterschiedlichen Konkretisierungsebenen

Funktionsträger erlauben eine funktionsorientierte Sichtweise auf das Produkt. Mithilfe der sie beschreibenden funktionsrelevanten Eigenschaften lässt sich jedoch die Brücke schlagen zur Perspektive der Fertigung, um die Möglichkeiten der gewählten Fertigungstechnologie gezielt für die Gestaltung der Funktionsträger nutzen zu können. Die Beschreibung mithilfe von Eigenschaften eignet sich dafür, sowohl Fertigungsaspekte als auch funktionale Aspekte zu berücksichtigen, was beispielsweise im Mapping von wirkprinziprelevanten Eigenschaften zu verfahrensinduzierten Eigenschaften genutzt wird.¹⁶² Verfahrensinduzierte Eigenschaften stellen die Eigenschaften dar, mit deren Hilfe die Gestaltung des Produkts vor-

¹⁶⁰ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 350.

¹⁶¹ Vgl. Wagner et al. (2016), S. 742; Roos (2018), S. 91.

¹⁶² Siehe Abschnitt 2.3.4.

genommen werden kann. Die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie hinsichtlich der Produktgestaltung lassen sich also in Form der von ihr bereitgestellten verfahrensinduzierten Eigenschaften und den zugehörigen Gestaltelementen erkennen. Die gezielte Nutzung von Eigenschaften und deren Abgleich aus unterschiedlichen Modellwelten spielt daher auch bei der Betrachtung einer fertigungsgetriebenen Funktionsintegration eine wichtige Rolle. In den folgenden Abschnitten werden die drei in Kapitel 3 vorgestellten Dimensionen der fertigungsintegrierenden Funktionsintegration auf Basis konsistenter Modelle beschrieben, um somit die Grundlage für die Entwicklung passender Hilfsmittel zu schaffen.

4.1.1 Funktionsintegration aus Sicht der Fertigungstechnologie: Technologieintegration und Gestaltelementintegration

Zur Herstellung eines Produkts werden Fertigungstechnologien eingesetzt, die erforderliche verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Eigenschaften bereitstellen, die für die Realisierung der Produktfunktionen notwendig sind.¹⁶³ Durch Technologieintegration verringert sich die Anzahl der eingesetzten Fertigungstechnologien zur Realisierung des Produkts, ohne dass die Anzahl der vom Produkt realisierten Funktionen verringert wird, wie in Kapitel 3 beschrieben. Um Möglichkeiten zur Technologieintegration zu erkennen, ist eine Betrachtung möglicher Funktionsträgervarianten sowie die Kenntnis der zur Verfügung stehenden verfahrensinduzierten Gestaltelemente notwendig, wie in Abbildung 27 dargestellt.

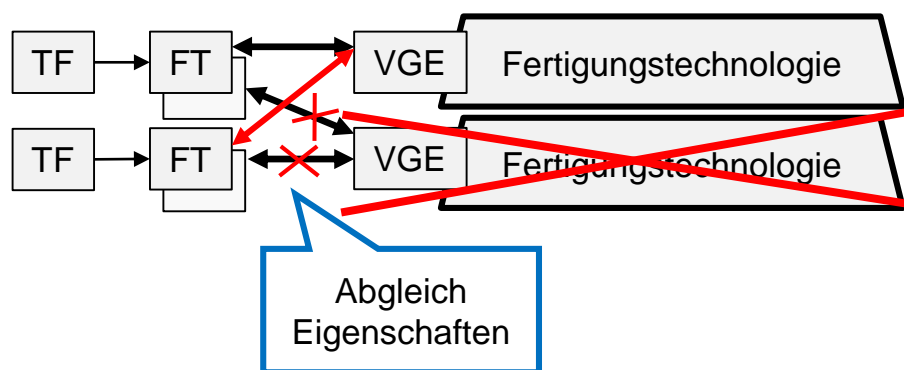


Abbildung 27: Verringerung der Anzahl eingesetzter Fertigungstechnologien

In Abbildung 27, einer Abbildung 24 erweiternden Darstellung, sind die Modellelemente Funktionsträger (FT) sowie verfahrensinduziertes Gestaltelement (VGE) ergänzt, die einen für die Technologieintegration notwendigen Abgleich zwischen

¹⁶³ Siehe Abschnitt 2.3.3.

der Sicht der Fertigung und der Funktion erlauben. Im Rahmen der Lösungsfindung werden für die verschiedenen Teilfunktionen des Produkts mögliche Varianten erarbeitet, für deren Erfüllung passende Funktionsträger (FT in Abbildung 27) notwendig sind. Verschiedene Funktionsträger weisen unterschiedliche funktionsrelevante Eigenschaften auf, um die ihnen zugeordnete Teilfunktion realisieren zu können. Eine Antriebsfunktion kann beispielsweise mithilfe eines Linearmotors realisiert werden, für den unter anderem der Luftspalt zwischen den ruhenden und den sich bewegenden Magneten eine funktionsrelevante Eigenschaft darstellt. Für einen Zahnstangenantrieb sind hingegen die Zähnezahzahl und der Durchmesser des Zahnrads wesentliche funktionsrelevante Eigenschaften. Verschiedene Fertigungstechnologien stellen verschiedene verfahrensinduzierte Gestaltelemente (VGE in Abbildung 27) bereit, mit denen die Funktionsträger realisiert werden. Die diesen Gestaltelementen zugeordneten verfahrensinduzierten Eigenschaften müssen in der Lage sein, die von den Funktionsträgern geforderten Eigenschaften bereitzustellen. Dafür ist ein systematischer Abgleich zwischen den funktionsrelevanten Eigenschaften der Funktionsträgervarianten und den verfahrensinduzierten Eigenschaften der verfahrensinduzierten Gestaltelemente der betrachteten Fertigungstechnologien notwendig.

Wird bei der Analyse einer Referenzlösung beispielsweise erkannt, dass Funktionsträger, die verschiedenen Teilfunktionen zugeordnet sind und mithilfe unterschiedlicher Fertigungstechnologien hergestellt werden, auch durch verfahrensinduzierte Gestaltelemente der gleichen Fertigungstechnologie realisiert werden können, so zeigt dies die Möglichkeit zur Umsetzung der Technologieintegration auf. Wird mehr als eine Fertigungstechnologie für die Realisierung des Produkts benötigt, werden, um Möglichkeiten einer Technologieintegration identifizieren zu können, die Optionen jeder einzelnen Technologie auf Basis der von ihr bereitgestellten fertigungsinduzierten Gestaltelemente und Eigenschaften analysiert und den funktionsrelevanten Eigenschaften möglicher Funktionsträgervarianten gegenübergestellt. So können Fertigungstechnologien identifiziert werden, die nicht verwendet werden müssen, wenn Funktionsträger, die mit ihrer Hilfe gefertigt wurden, auch durch andere Fertigungstechnologien bereitgestellt werden, die in der Lage sind, noch zusätzliche Funktionsträger zu realisieren.

Eine unter Berücksichtigung der Technologieintegration entwickelte Variante kann auch den Einsatz einer Fertigungstechnologie notwendig machen, die bislang nicht verwendet wurde, wenn dies eine Verringerung der insgesamt eingesetzten

Technologien mit sich bringt. Nutzen und Aufwand eines solchen Wechsels müssen in diesem Fall bei der Beurteilung der entwickelten Lösungen besonders hinterfragt werden, da damit unter anderem Prozesserfahrung, die mit den ursprünglichen Fertigungstechnologien gesammelt worden ist, nicht mehr eingesetzt werden könnte. Auch kann es sein, dass sich zwei eingesetzte Fertigungstechnologien durch eine besonders hohe Kosteneffizienz in der Fertigung auszeichnen, die von einer einzigen Fertigungstechnologie nicht erreicht werden kann. Schachfiguren lassen sich beispielsweise in großen Stückzahlen mithilfe nacheinander geschalteter Dreh- und Fräsprozesse herstellen. Alternativ ließe sich die charakteristische Form der Schachfigur aber auch mithilfe additiver Fertigungsverfahren wie dem Laser-Sintern realisieren.¹⁶⁴ Durch additive Fertigungsverfahren sind insbesondere auch Geometrien im Inneren eines Werkstücks („interne Hohlräume“) möglich¹⁶⁵, die mit anderen Fertigungstechnologien nicht herstellbar sind. Große Stückzahlen lassen sich mit dieser Technologie jedoch nicht realisieren, weswegen in diesem Fall die Reduktion der Anzahl eingesetzter Technologien nur im Falle geringer angestrebter Stückzahlen zweckmäßig erscheint. Grundsätzlich sollte die Konstruktion auch von der angestrebten Stückzahl abhängen.¹⁶⁶

Der Grad an Technologieintegration ist gleichzeitig ein Indikator dafür, in welchem Umfang die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie genutzt werden. Eine Fertigungstechnologie wird hinsichtlich ihrer bereitgestellten Gestaltungsmöglichkeiten umso umfassender ausgenutzt, je mehr Funktionen mithilfe der für die betrachtete Technologie charakteristischen verfahrensinduzierten Gestaltelemente realisiert werden.

Eine abgeschwächte Form der Technologieintegration stellt die Gestaltelementintegration dar, die in Abbildung 28 dargestellt ist.

¹⁶⁴ Siehe z.B. EOS GmbH (2018).

¹⁶⁵ Vgl. Gebhardt (2007), S. 347f.

¹⁶⁶ Vgl. Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 500.

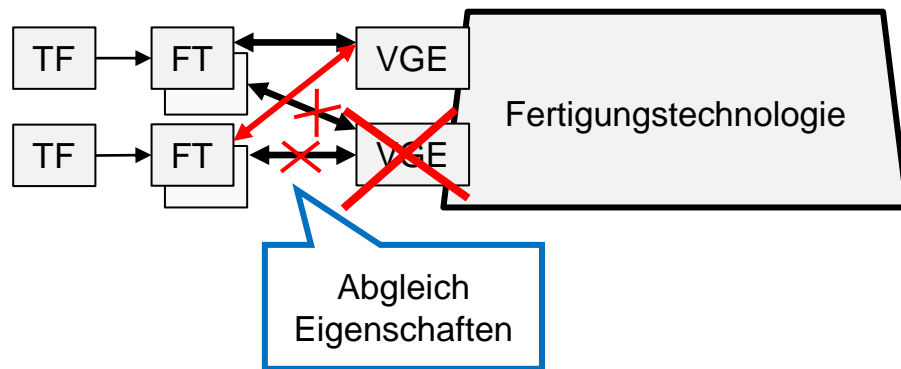


Abbildung 28: Verringerung der Anzahl verwendeter verfahrensinduzierter Gestaltelemente

Neben der Anzahl an notwendigen Fertigungstechnologien kann auch die Anzahl unterschiedlicher verfahrensinduzierter Gestaltelemente einer einzelnen betrachteten Fertigungstechnologie, die zur Erfüllung der Produktfunktion eingesetzt wird, einen Einfluss auf den Fertigungsaufwand haben.

Die HSC-Fertigungstechnologie erlaubt beispielsweise die Realisierung verschiedener verfahrensinduzierter Gestaltelemente wie „Bohrung“, „Nut“, „Langloch“ oder „Tasche“. Nicht für jedes mithilfe der HSC-Technologie hergestellte Produkt ist es jedoch zwingend notwendig, alle genannten verfahrensinduzierten Gestaltelemente in der Produktgestaltung zu verwenden. Beispielsweise kann ein Bauteil die Funktion „Befestigungsmöglichkeit bereitstellen“ möglicherweise nur mithilfe von Bohrungen realisieren, so dass zusätzlich HSC-gefertigte Langlöcher entfallen können. Ein verfahrensinduziertes Gestaltelement muss hierbei in der Lage sein, genau wie bei der Technologieintegration, verschiedene Funktionsträger zu realisieren, die für die Bereitstellung der Produktfunktion verwendet werden. Die Verringerung der Anzahl realisierter verschiedenartiger verfahrensinduzierter Gestaltelemente kann zu einer Reduzierung des Fertigungsaufwands führen, indem beispielsweise Werkzeuge oder Rüstvorgänge zur Erzeugung unterschiedlicher verfahrensinduzierter Gestaltelemente eingespart werden.

4.1.2 Funktionsintegration aus Sicht der Funktionserfüllung: Funktionserweiterung

Während die in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Technologieintegration und Gestaltelementintegration hauptsächlich die Verringerung des Herstellungsaufwands begünstigen, zeichnet sich die Funktionserweiterung durch einen Fokus auf die Steigerung des Kundennutzens aus. Eine Funktionserweiterung stellt die Erhöhung der Anzahl bereitgestellter Funktionen durch die entwickelte Lösung im Vergleich

zu einer Referenzlösung dar, ohne dass sich die Anzahl notwendiger Technologien erhöht, wie in Abbildung 29 dargestellt.

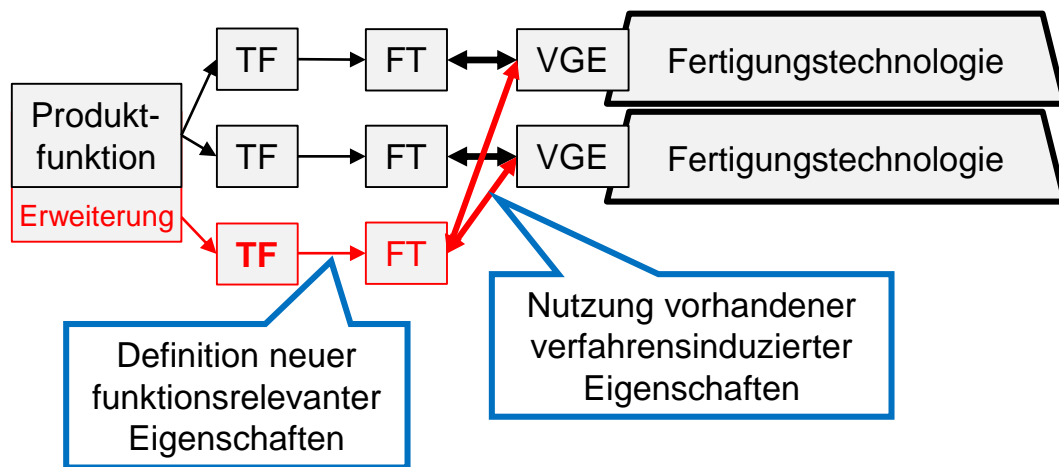


Abbildung 29: Funktionserweiterung

Hierfür wird zunächst die Funktionsstruktur des Produkts um zusätzliche Teilfunktionen erweitert, die, abgestimmt auf das jeweilige Entwicklungsziel, einen Zugewinn an Kundennutzen versprechen. Für diese Teilfunktionen ergeben sich neue Funktionsträger, die mithilfe neuer funktionsrelevanter Eigenschaften charakterisiert werden können. Diese neuen funktionsrelevanten Eigenschaften werden den verfahrensinduzierten Eigenschaften der verfahrensinduzierten Gestaltelemente gegenübergestellt, mit deren Hilfe bereits andere Funktionsträger des Produkts realisiert werden. Die Steigerung der Funktionalität wird damit durch die neuen Funktionsträger ermöglicht, die dabei mithilfe von verfahrensinduzierten Gestaltelementen bereits eingesetzter Technologien realisiert werden. Ziel der Funktionserweiterung ist die umfassende Nutzung der Gestaltungsmöglichkeiten einer bestimmten Fertigungstechnologie. Betrachtet man das in Abbildung 4 dargestellte Beispiel der Lampenaufhängung mithilfe der elektrischen Leitung, so stellt dies aus Sicht des Gestaltelements „Leitung“ eine Funktionserweiterung dar. Statt nur die Funktion „Energie leiten“ zu übernehmen, erfüllt das Gestaltelement in dieser Ausführungsform des Produkts zugleich die Funktion „Kraft leiten“.

4.1.3 Funktionsintegration aus Sicht der Baustruktur: Integralbauweise

Die physische Realisierung eines Produkts ist das Ergebnis eines mithilfe geeigneter Verfahren realisierten Fertigungsprozesses oder einer Fertigungsprozesskette, in dem das Produkt als Operand fungiert.¹⁶⁷ Die Gestaltung der Baustruktur hinsichtlich Integral- oder Differentialbauweise, also die Festlegung, mit welcher Art und Anzahl von Einzelteilen (ET) das Produkt am Ende zusammengesetzt wird, ist damit maßgeblich von der eingesetzten Fertigungstechnologie abhängig, wie in Abbildung 30 dargestellt.

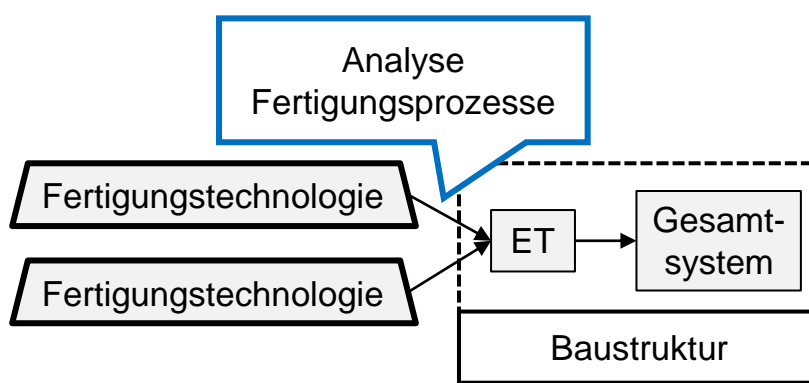


Abbildung 30: Integralbauweise

Ist das eingesetzte Fertigungsverfahren nicht bekannt, so kann auch keine Aussage über die erreichbare Baustruktur getroffen werden. Die vom Produkt bereitgestellten Produktfunktionen stehen hier zunächst nicht im Mittelpunkt der Betrachtung. Durch die Wahl des Fertigungsverfahrens wird festgelegt, ob verfahrensinduzierte Gestaltelemente, welche die für die Produktfunktion notwendigen Funktionsträger realisieren, innerhalb eines Einzelteils gefertigt werden können, oder ob dafür verschiedene Einzelteile notwendig sind.

Die Spaltprofiliertechnologie stellt mit dem durch sie herstellbaren spaltprofilierten Flansch und dem Stegbereich zwischen beiden Flanschen zwei verschiedene verfahrensinduzierte Gestaltelemente bereit, die zwangsläufig in Integralbauweise auf demselben Einzelteil realisiert sind. Gleichzeitig können Produkte, die in Integralbauweise vorliegen, auch von verschiedenen Fertigungstechnologien realisiert worden sein, wie beispielsweise bei einem durch Fräsen erzeugten Grundkörper, in den zusätzliche Bohrungen eingebracht worden sind.

¹⁶⁷ Siehe Abschnitt 2.3.3.

4.1.4 Fazit: Konsistente Modellierung auf Basis von Eigenschaften als Grundlage für die Funktionsintegration

Während verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Eigenschaften die Gestaltungsmöglichkeiten einer Fertigungstechnologie beschreiben, ist die Modellierung eines Produkts mithilfe von Funktionsträgern und funktionsrelevanten Eigenschaften von einer funktionsorientierten Produktentwicklung geprägt. Damit bildet die konsistente Modellierung auf Basis von Eigenschaften die Grundlage für eine gezielte Erweiterung des Lösungsraums um Lösungen mit einem hohen Integrationsgrad. Dabei sind die verwendeten Modelle allgemeingültig und die auf ihnen basierenden Integrationsstrategien entsprechend für beliebige Funktionen und Fertigungstechnologien anwendbar. Die modellbasierte Betrachtung der Funktionsintegration aus beiden Sichten schafft ein Bewusstsein für Möglichkeiten zur Aufwandsverringerung und zur Steigerung der Produktfunktionalität durch die Generierung neuer Lösungen. Eine Betrachtung verfahrensinduzierter Gestaltelemente kann insbesondere die Konkretisierung beim Übergang in die Phase der Gestaltung unterstützen, da sie sich auf dem Konkretisierungsniveau der Produktgestalt befinden. Bei der Entwicklung von neuen Lösungen können die in den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 vorgestellten Integrationsstrategien auch unabhängig voneinander umgesetzt werden. Ausgehend von einer Referenzlösung können die Möglichkeiten zur fertigungsgetriebenen Funktionsintegration einzeln überprüft werden und in Form verschiedener Lösungen umgesetzt werden. Besonders vielversprechend erscheint allerdings die Umsetzung aller drei Strategien, um Lösungen zu finden, die mit geringem Herstellaufwand einen hohen Kundennutzen bereitstellen.

4.2 Implementierung der fertigungsgetriebenen Funktionsintegration in die Produktentwicklung

Die Erweiterung des Lösungsraums um Lösungen, die sich durch einen hohen Integrationsgrad auszeichnen, erfordert die gleichzeitige Betrachtung der Lebenslaufphasen hinsichtlich Herstellung und Nutzung des Produkts. Aufbauend auf

dem Grundgedanken des Ansatzes zur fertigungsintegrierenden Produktentwicklung wie in Abbildung 18 dargestellt¹⁶⁸, zeigt Abbildung 31 den Prozess der Produktentwicklung verknüpft mit den für die fertigungsgetriebene Funktionsintegration wesentlichen Lebenslaufphasen des Produkts auf Basis von Eigenschaften.¹⁶⁹

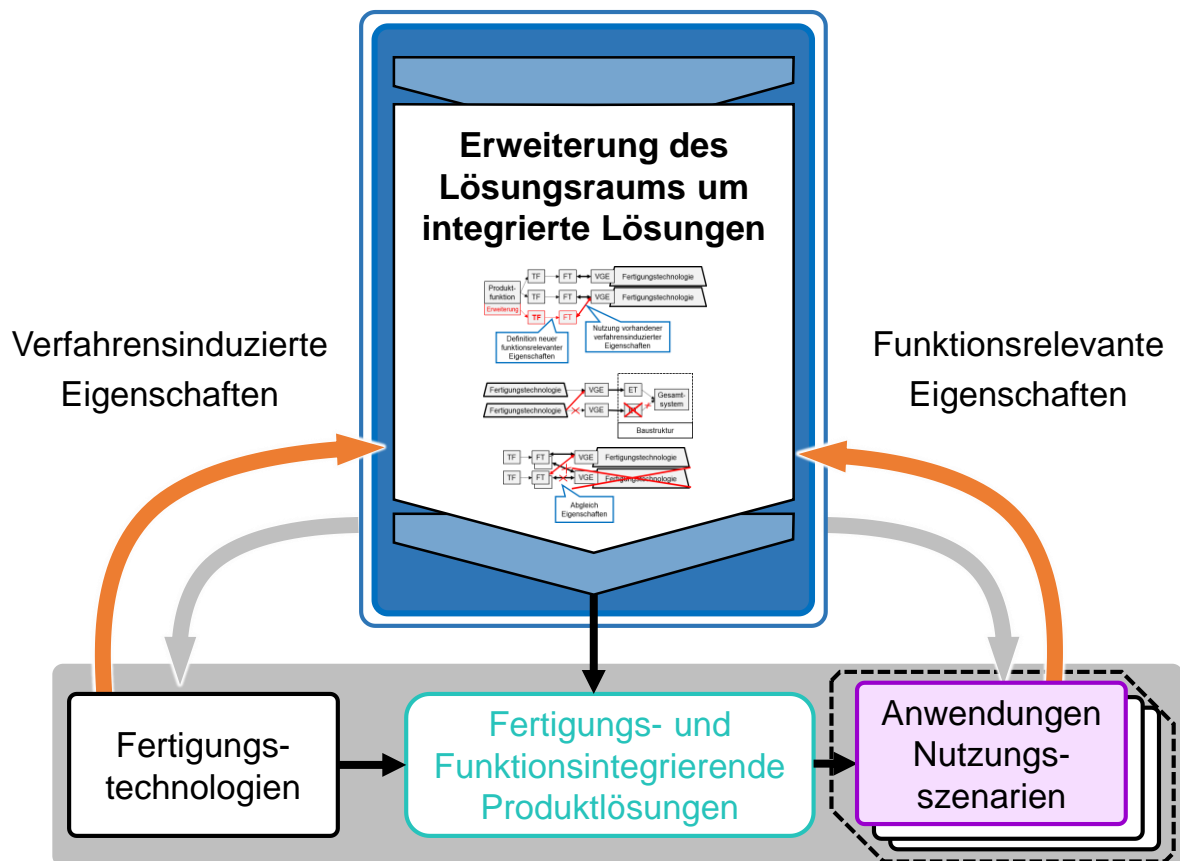


Abbildung 31: Erweiterung des Lösungsraums um integrierte Lösungen unter Berücksichtigung verschiedener Prozesse des Produktlebenslaufs

Die Erweiterung des Lösungsraums ist dabei nur ein Teilprozess des Produktentwicklungsprozesses, dem unter anderem die Projektdefinitionsphase vorgeschaltet ist und dem eine weiterführende Konkretisierung und Beurteilung der entwickelten Lösungen folgt. Die Umsetzung der in Abschnitt 4.1.1 bis 4.1.3 dargestellten Integrationsstrategien erfordert das gleichzeitige Wissen über geeignete Fertigungstechnologien sowie passende Anwendungen, in denen die Umsetzung von Funktionsintegration zweckmäßig erscheint. Dem Lösungssucheprozess werden hierfür zusätzlich die relevanten verfahrensinduzierten Eigenschaften und die zu erfüllenden funktionsrelevanten Eigenschaften zugeführt.

¹⁶⁸ Siehe Abschnitt 2.3.4.

¹⁶⁹ Vgl. Wagner et al. (2017), S.275ff.

4.2.1 Identifikation verfahrensinduzierter Gestaltelemente und Eigenschaften

Die gezielte Nutzung der Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie für die Produktentwicklung im Allgemeinen und für die Realisierung von Produkten mit hohem Integrationsgrad im Speziellen erfordert die Formalisierung ihrer für die Produktentwicklung relevanten Möglichkeiten.¹⁷⁰ Die Identifikation charakteristischer verfahrensinduzierter Gestaltelemente und Eigenschaften geschieht auf Basis einer Analyse der eingesetzten Fertigungstechnologien. Das von ROOS (2018) eingeführte Vorgehen auf Basis des Verfahrensprinzipmodells erlaubt dabei die Identifikation wesentlicher verfahrensinduzierter Gestaltelemente.¹⁷¹ Abbildung 16 zeigt unter Verwendung dieses Modells wesentliche verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Eigenschaften des Spaltprofilierens.

Die verfahrensinduzierten Gestaltelemente und Eigenschaften repräsentieren den Gestaltungsspielraum, den der Konstrukteur zur Realisierung der für die Funktionserfüllung notwendigen Funktionsträger zur Verfügung hat. Manche technologiebedingte Eigenschaft eines Gestaltelements lässt sich allerdings nur in wenigen Fällen gewinnbringend nutzen, wie beispielsweise entstehende Grate oder Lunker. Der Formalismus der Eigenschaft, die sich aus Merkmal und Wert zusammensetzt¹⁷², erlaubt es, neben den besonderen Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie auch ihre Grenzen zu dokumentieren. Hierzu wird ein möglicher Wertebereich, den das entsprechende Merkmal annehmen kann, definiert. So können bei Biegeprozessen beispielsweise nur bestimmte Biegeradien erreicht werden¹⁷³, die sich in Form eines Wertebereichs für die verfahrensinduzierte Eigenschaft „Biegewinkel“ des verfahrensinduzierten Gestaltelements „Gebogenes Blech“ erfassen lassen. Durch die Betrachtung der verfahrensinduzierten Eigenschaften wird also sowohl ein Bewusstsein geschaffen für technologiespezifische Möglichkeiten zur Gestaltung und damit auch zur Realisierung neuer Produktlösungen, als auch für Grenzen der verwendeten Fertigungstechnologien.

¹⁷⁰ Vgl. Wagner et al. (2017), S. 278.

¹⁷¹ Siehe Abschnitt 2.3.4.

¹⁷² Vgl. Birkhofer, Wäldele (2008), S. 22.

¹⁷³ Vgl. DIN 6935 (2011), S. 5.

4.2.2 Identifikation geeigneter Anwendungsszenarien und Funktionen auf Basis der Fertigungstechnologie

Die Funktionsstruktur lässt sich mithilfe verschiedener Methoden wie Funktionsanalyse, Funktionssynthese oder einer Variation der Funktionsstruktur und der Verschiebung der Systemgrenze modellieren.¹⁷⁴ Mögliche Anwendungsszenarien hängen dabei davon ab, welche Funktionen vom Produkt realisiert werden können. Im Rahmen eines Innovationsprojekts, das auf der umfassenden Nutzung der Möglichkeiten der Fertigungstechnologie basiert, muss dafür zunächst die Kompatibilität der angedachten Funktionen und der von der Fertigungstechnologie bereitgestellten verfahrensinduzierten Eigenschaften und Gestaltelementen sichergestellt werden.¹⁷⁵

Im Kontext der fertigungsintegrierenden Funktionsintegration ist es jedoch unumgänglich, eine Vorauswahl hinsichtlich der Eignung der verfahrensinduzierten Eigenschaften für die Funktion zu treffen, um damit eine Anwendungskategorie grob abzustecken. Die verfahrensinduzierten Eigenschaften, die entsprechend der Darstellung in Abschnitt 4.2.1 antizipiert wurden, werden funktionsrelevanten Eigenschaften gegenübergestellt – beispielsweise durch ein Mapping von Eigenschaften.¹⁷⁶ Die Betrachtung der verfügbaren verfahrensinduzierten Gestaltelemente liefert damit Anhaltspunkte für mögliche Anwendungsszenarien und Nutzungsprozesse.¹⁷⁷ Beispielsweise eignen sich die von der Spaltprofiliertechnologie bereitgestellten verfahrensinduzierten (Geometrie-)Eigenschaften der spaltprofilierten Flansche grundsätzlich für den Einsatz in Linearführungsanwendungen, da sie aufgrund ihrer Geometrie Freiheitsgrade sperren können, was für Linearführungen mit Wälzkörpern notwendig ist. Für eine Präzisierung des möglichen Anwendungsszenarios müssen jedoch die Auswirkungen der verfahrensinduzierten Gestaltelemente auf die Funktionserfüllung im Nutzungsprozess untersucht werden.¹⁷⁸ Neben der reinen Führung ist im Bereich der Linearführungen auch die Bereitstellung einer Wälzkontaktfläche notwendig, die unter anderem durch ihre Lebensdauer

¹⁷⁴ Vgl. Becerril et al. (2016), S. 702ff.; Ehrlenspiel, Meerkamm (2013), S. 148; Ponn, Lindemann (2011), S. 65 - 80.

¹⁷⁵ Vgl. Wagner et al. (2017), S. 278.

¹⁷⁶ Siehe Abschnitt 2.3.4.

¹⁷⁷ Vgl. Wagner et al. (2017), S. 275ff.

¹⁷⁸ Vgl. Wagner et al. (2017), S. 278.

charakterisiert ist. Spaltprofilierte Flansche weisen durch das UFG-Gefüge auf ihrer Oberfläche eine hohe Härte und geringe Rauheit auf.¹⁷⁹ In experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass diese verfahrensinduzierten Eigenschaften des spaltprofilierten Flanschs im Vergleich zum Ausgangsmaterial (ZStE 340) eine signifikante Erhöhung der Lebensdauer hinsichtlich des Schadenskriteriums Abblätterung mit sich bringt¹⁸⁰, wie in Abbildung 32 dargestellt.

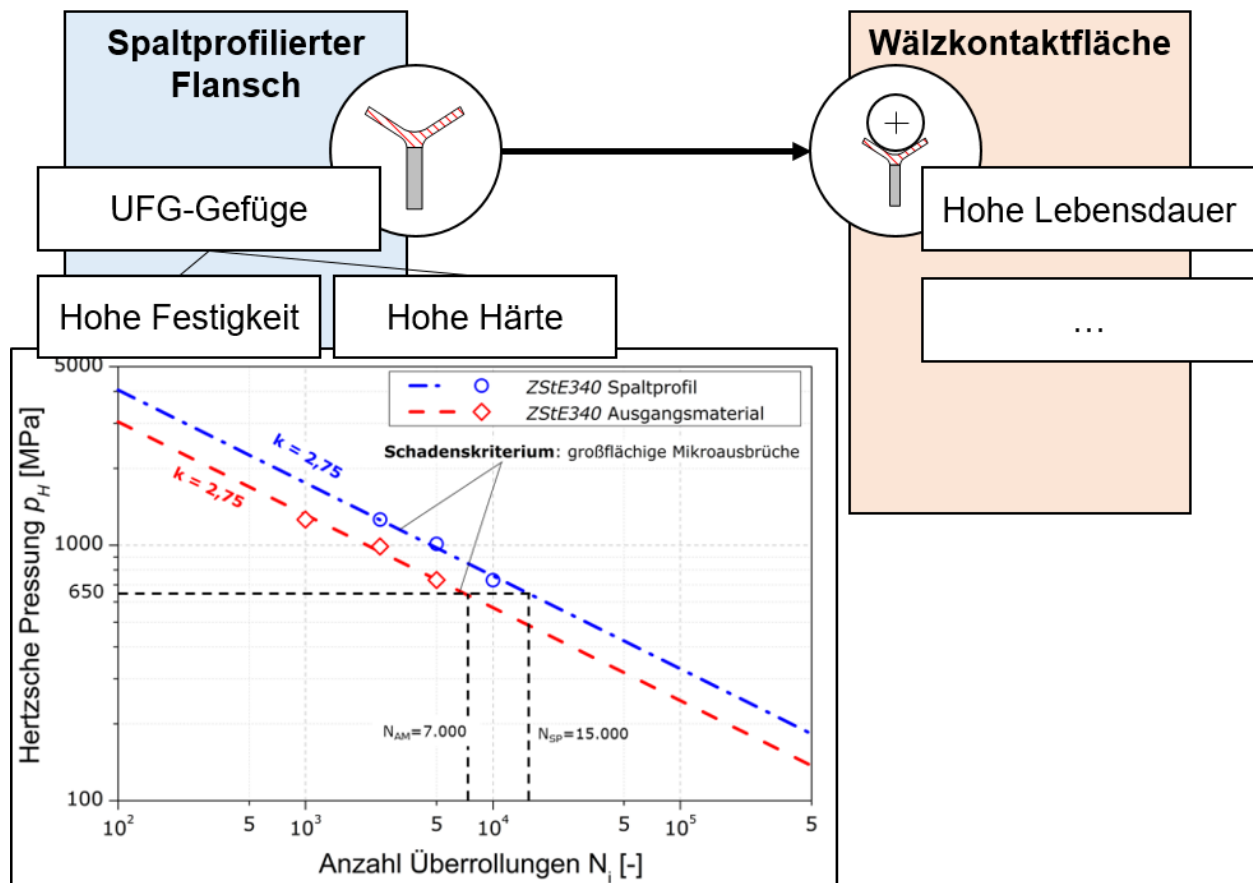


Abbildung 32: Auswirkung der verfahrensinduzierten Eigenschaften des Spaltprofilierens auf funktionsrelevante Eigenschaften einer Wälzkontaktfläche¹⁸¹

Spaltprofilierte Flansche eignen sich also für Anwendungen im Linearführungsbe-
reich, in denen die hohe Lebensdauer relevant ist. Durch die Untersuchung weiter-
erer funktionsrelevanter Eigenschaften im Bereich der Linearführungen lässt sich
das Anwendungsszenario weiter präzisieren. Durch Funktionsintegration lässt sich
das Anwendungsspektrum auf Basis der Fertigungstechnologie erweitern, indem
zusätzlich zu den Funktionen „Linear führen“ und „Wälzkontaktfläche bereitstellen“

¹⁷⁹ Vgl. Karin et al. (2010), S. 114 - 116.

¹⁸⁰ Vgl. Karin (2016), S. 137 - 141.

¹⁸¹ In Auszügen aus Karin et al. (2014), S. 130.

beispielsweise eine Antriebsfunktion integriert wird, was völlig neue Nutzungsprozesse zulassen würde.

4.2.3 Erarbeitung von fertigungsintegrierenden Funktionsträgern

In etablierten Entwicklungsmethoden wird das zu entwickelnde technische System mithilfe von Teilfunktionen modelliert, um die Komplexität des Entwicklungsvorhabens beherrschbar zu machen. Für diese Teilfunktionen werden Teillösungen gesucht und zu prinzipiellen Gesamtlösungen kombiniert.¹⁸² Der Ansatz zur fertigungsorientierten Funktionsintegration sieht einen ähnlichen Weg vor. Für Teilfunktionen werden ausgehend von allgemeingültigen Funktionsträgern fertigungsintegrierende Lösungselemente¹⁸³ bzw. Funktionsträger erarbeitet und somit die Möglichkeiten der eingesetzten Fertigungstechnologie zur Funktionserfüllung ausgeschöpft. Anschließend werden diese fertigungsintegrierenden Lösungselemente unter Berücksichtigung der Integrationsstrategien zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt, die möglichst alle Teilfunktionen realisiert.

Ausgehend von dem Wissen über mögliche Anwendungsszenarien werden daher zunächst geeignete Funktionsträger identifiziert. Zur Erarbeitung möglicher Funktionsträgervarianten stehen eine Vielzahl etablierter Lösungsfindungsmethoden zur Verfügung, wie beispielsweise Systematische Variation, die Anwendung von Kreativitätstechniken, die Verwendung von Konstruktions- und Lösungskatalogen oder die Analyse von Vorgänger- oder Wettbewerberprodukten. Dabei kann der Konkretisierungsgrad der Funktionsträger zweckmäßig gewählt werden. Liegen schon konkrete Erkenntnisse aus beispielsweise der Analyse von Vorgängerprodukten vor, so können sich auch die erfassten Funktionsträger bereits auf einem detaillierten Konkretisierungsniveau befinden. Zur Erweiterung des Lösungsraums können durch Variation des zugrundeliegenden Effekts oder des Wirkprinzips dieser Funktionsträger zusätzliche Varianten erzeugt werden. Die so erarbeiteten Funktionsträger stellen zunächst prinzipielle Lösungsmöglichkeiten für die unterschiedlichen Funktionen des Produkts dar und sind nicht zwangsläufig abhängig von der gewählten Fertigungstechnologie.

Durch die Verknüpfung dieser zunächst fertigungstechnologieunabhängigen Funktionsträger mit den antizipierten fertigungsinduzierten Gestaltelementen der gewählten Fertigungstechnologie können fertigungsintegrierende Lösungen bzw.

¹⁸² Siehe Abschnitt 2.3.2.

¹⁸³ Siehe Abschnitt 2.3.4.

Funktionsträgervarianten entwickelt werden. Verfahrensinduzierte Gestaltelemente spiegeln die technologiespezifischen Gestaltungsmöglichkeiten der gewählten Fertigungstechnologie wider. Durch diese gezielte Verknüpfung von verfahrensinduzierten Gestaltelementen und Funktionsträgern können somit Lösungselemente generiert werden, die technologiespezifische Gestaltungsmöglichkeiten für die Funktionserfüllung systematisch ausschöpfen. Diese zeichnen sich durch eine umfassende Nutzung fertigungstechnologiespezifischer Möglichkeiten zur Funktionserfüllung aus und können dadurch mit Vorteilen hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Herstellkosten einhergehen.

Die Gegenüberstellung von Funktionsträgern und verfahrensinduzierten Gestaltelementen schafft ein Bewusstsein für die Möglichkeiten der Fertigungstechnologien zur Gestaltung des Produkts und unterstützt damit bei einer Konkretisierung insbesondere den Übergang von der prinzipiellen Ebene zur Ebene der Gestalt – schließlich sind verfahrensinduzierte Gestaltelemente stets Elemente auf Gestaltungsebene, während die entwickelten Funktionsträger je nach Bedarf auf auch abstrakteren Konkretisierungsebenen angesiedelt sein können.¹⁸⁴

Die Zahl der generierten fertigungsintegrierenden Funktionsträgervarianten kann sehr unterschiedlich sein. Bei einer ungeeigneten Fertigungstechnologie ist es möglich, dass keine fertigungsintegrierende Funktionsträgervariante zur Realisierung der Funktionsträgervariante gefunden werden kann. Andere Fertigungstechnologien erlauben hingegen möglicherweise eine Vielzahl unterschiedlicher fertigungsintegrierender Funktionsträgervariante derselben Funktionsträgervariante.

Werden bei der Gegenüberstellung der Eigenschaften verfahrensinduzierte Gestaltelemente identifiziert, die nur eine Teilmenge der funktionsrelevanten Eigenschaften eines Funktionsträgers bereitstellen können, so besteht die Möglichkeit, dass das verfahrensinduzierte Gestaltelement erst in Kombination mit einem anderen verfahrensinduzierten Gestaltelement in der Lage ist, eine Lösung zu realisieren. Abbildung 33 stellt einen fertigungsintegrierenden Funktionsträger dar, der aus unterschiedlichen verfahrensinduzierten Gestaltelementen zusammengesetzt ist.

¹⁸⁴ Siehe Abschnitt 4.1.

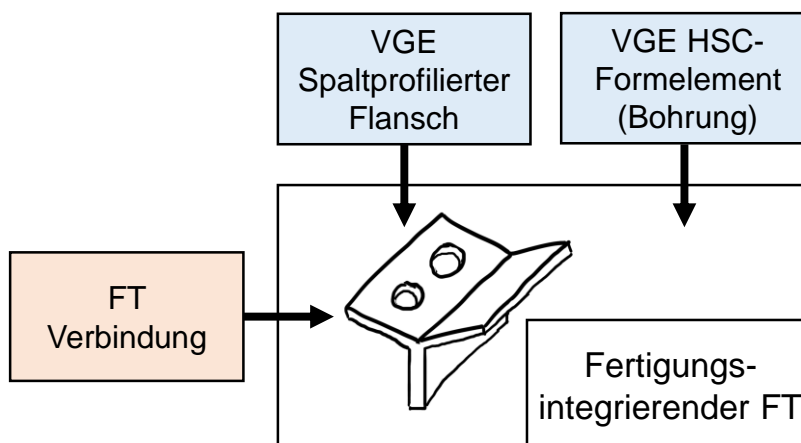


Abbildung 33: Fertigungsintegrierender Funktionsträger für eine Verbindung

Zur Realisierung eines Funktionsträgers zur Herstellung einer Verbindung durch das Einbringen von Bohrungen in ein Blech finden sich in diesem fertigungsintegrierenden Funktionsträger die verfahrensinduzierten Gestaltelemente „Spaltprofilierte Flansch“ und „HSC-Formelement/Bohrung“ wieder. Der Funktionsträger wird zu einem *fertigungsintegrierenden* Funktionsträger, da in ihm gezielt die verfahrensinduzierten Eigenschaften des spaltprofilierten Flanschs zu einer Verbesserung der Funktionserfüllung genutzt werden: Spaltprofilierte Flansche zeichnen sich durch eine verringerte Kerbempfindlichkeit im Flanschbereich aus, wodurch die Spannungsüberhöhungen, die durch das Einbringen der Bohrungen auftreten, ertragen werden können.¹⁸⁵

4.2.4 Kombination fertigungsintegrierender Funktionsträger unter Berücksichtigung der Integrationsstrategien

Die erarbeiteten fertigungsintegrierenden Funktionsträgervarianten stellen zunächst nur Varianten für die Realisierung einzelner Funktionen dar, die zu einer Gesamtlösung kombiniert werden müssen, die alle notwendigen Produktfunktionen bereitstellt. Bei dieser Kombination ermöglicht insbesondere die Anwendung der in den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 beschriebenen modellbasierten Integrationsstrategien die Kombination von Gesamtlösungen, die sich durch einen hohen Integrationsgrad auszeichnen, wie in Abbildung 34 dargestellt.

¹⁸⁵ Vgl. Gramlich et al. (2015), S. 6 - 8.

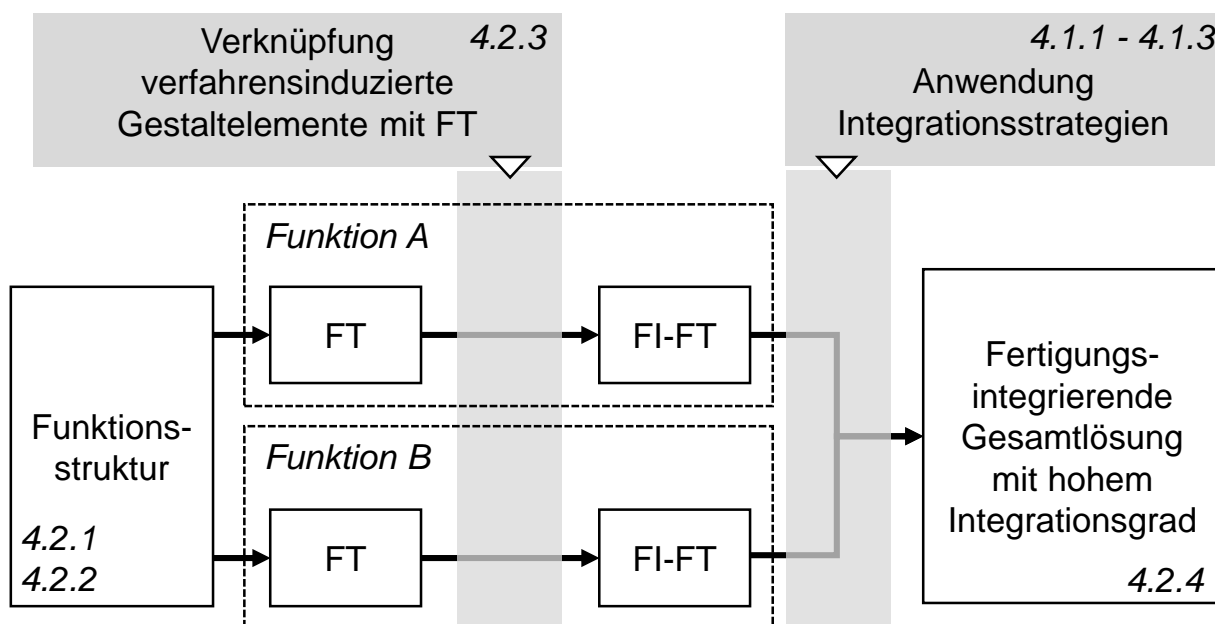


Abbildung 34: Kombination der Funktionsträger zu Gesamtlösungen mit hohem Integrationsgrad

Ausgehend von den entwickelten fertigungsintegrierenden Funktionsträgern (FI-FT in Abbildung 34), können durch eine Kombination dieser Funktionsträger Produktlösungen generiert werden, die die gewünschten Produktfunktionen realisieren. Die Integrationsstrategien können dabei sukzessive umgesetzt werden, sie sind jedoch auch unabhängig voneinander anwendbar. So können beispielsweise – durch die Verwendung eines verfahrensinduzierten Gestaltelements zur Realisierung zusätzlicher Funktionen – Lösungen auf Basis der Funktionserweiterung entwickelt werden, in denen jedoch keine gleichzeitige Technologieintegration umgesetzt wurde, da sich diese neuen Lösungen nicht mithilfe einer geringeren Anzahl verfahrensinduzierter Gestaltelemente unterschiedlicher Fertigungstechnologien erzeugen lassen. Besonders vielversprechend erscheinen jedoch Lösungen, in denen alle drei Aspekte umgesetzt sind, so dass sie einen besonders hohen Integrationsgrad aufweisen. Mit wenigen zu realisierenden Einzelteilen werden in diesen Lösungen eine hohe Anzahl an Funktionen bereitgestellt und die Möglichkeiten der gewählten Fertigungstechnologien in einem hohen Maß für die Produktgestaltung ausgeschöpft.

Zur Umsetzung von Gesamtlösungen, in denen eine Technologieintegration¹⁸⁶ realisiert werden soll, werden zunächst mögliche Kombinationen aus Funktionsträgern gesucht, die mithilfe von verfahrensinduzierten Gestaltelementen realisiert

¹⁸⁶ Siehe Abschnitt 4.1.1.

werden, welche gemeinsam die gewünschten Produktfunktionen erfüllen können, dabei jedoch den Einsatz möglichst weniger Fertigungstechnologien notwendig machen. Dabei hilft es, als Ausgangspunkt die verfahrensinduzierten Gestaltelemente zu wählen, mit deren Hilfe eine Referenzlösung realisiert wird und von diesen ausgehend alternative verfahrensinduzierte Gestaltelemente zu suchen, die unter Verwendung einer geringeren Anzahl an Fertigungstechnologien die gleiche Funktionalität bereitstellen können.

Für die Gestaltelementintegration¹⁸⁷ werden gezielt verfahrensinduzierte Gestaltelemente einer Fertigungstechnologie zur Kombination ausgewählt, die für sich alleine bereits die Realisierung der notwendigen Funktionsträger erlauben und nicht mit zusätzlichen verfahrensinduzierten Gestaltelementen kombiniert werden müssen. Eine Gestaltelementintegration kann dabei unabhängig von einer vorher durchgeführten Technologieintegration umgesetzt werden. So sind auch vielversprechende Lösungen denkbar, die zwar den Einsatz mehrerer Technologien voraussetzen, dabei aber dennoch nur auf eine geringe Anzahl verschiedener verfahrensinduzierter Gestaltelemente zurückgreifen müssen.

Die Umsetzung der Methode Funktionserweiterung¹⁸⁸ in einer Gesamtlösung erfordert verfahrensinduzierte Gestaltelemente, mit deren Hilfe sich Funktionsträger unterschiedlicher Funktionen realisieren lassen. Dadurch lassen sich Gesamtlösungen finden, deren Funktionsträger unterschiedlicher Funktionen mithilfe gleicher verfahrensinduzierter Gestaltelemente realisiert werden.

Die Entwicklung einer integralen Baustruktur¹⁸⁹ wird insbesondere durch eine sorgfältige Wahl der eingesetzten Fertigungstechnologien unterstützt. Werden für die Kombination der einzelnen Funktionsträger nur Fertigungstechnologien eingesetzt, die zueinander kompatibel sind und die Realisierung von Integralbauteilen erlauben, so können Gesamtlösungen mit einem hohen Grad an Integralbauweise entstehen. Die Spaltprofiliertechnologie lässt sich in einer Fließfertigung mit anderen Fertigungstechnologien, wie dem Walzprofilieren, dem Spaltbiegen oder einer HSC-Bearbeitung kombinieren und erlaubt damit die Fertigung komplexer Geometrien in Integralbauweise.¹⁹⁰

¹⁸⁷ Siehe Abschnitt 4.1.1.

¹⁸⁸ Siehe Abschnitt 4.1.2.

¹⁸⁹ Siehe Abschnitt 4.1.3.

¹⁹⁰ Vgl. Ludwig et al. (2008), S. 79 - 84.

Abbildung 35 greift das in Abbildung 25 dargestellte Beispiel auf und stellt die fertigungsintegrierende Funktionsintegration auf Basis der relevanten Modellelemente dar.

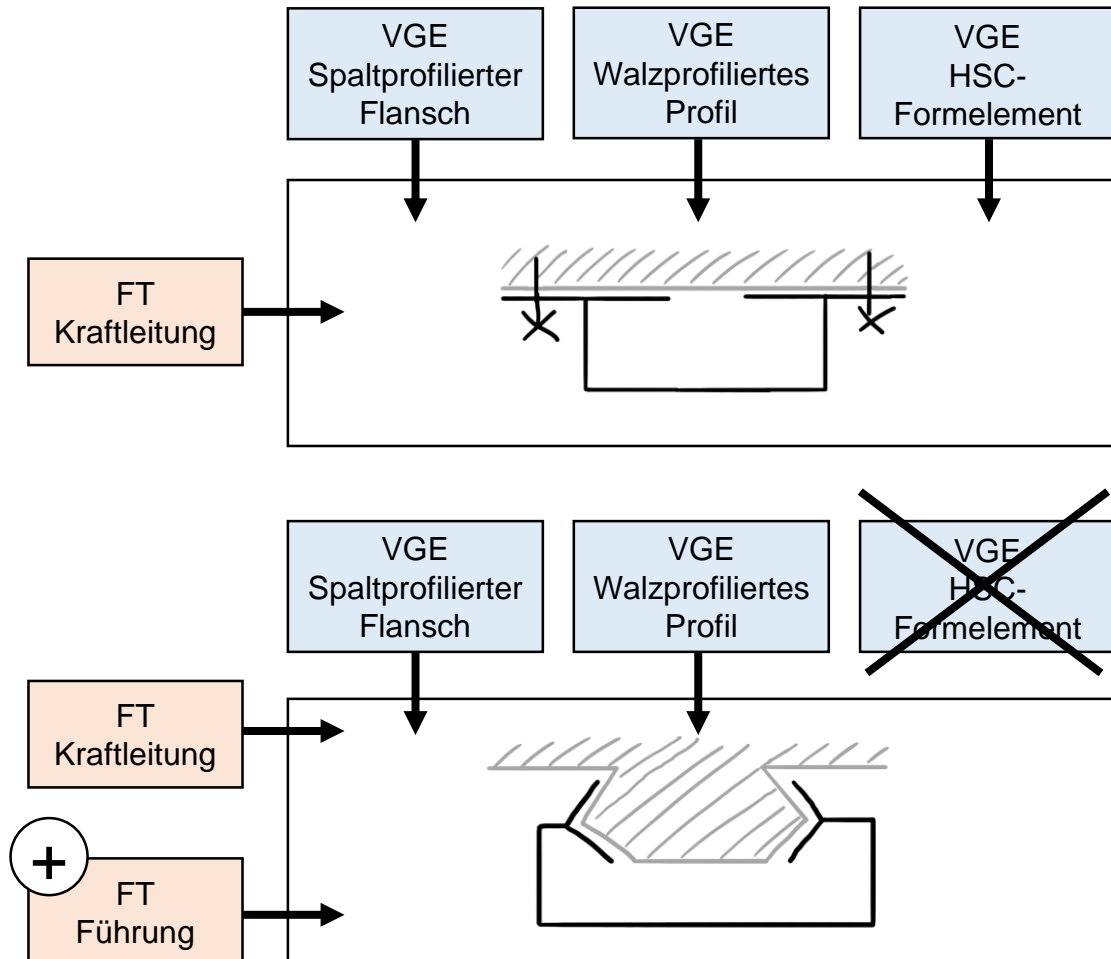


Abbildung 35: Vergleich zweier fertigungsintegrierender Gesamtlösungen mit unterschiedlichem Integrationsgrad

Beide in Abbildung 35 dargestellten Gesamtlösungen realisieren unterschiedliche Funktionsträgervarianten zur Bereitstellung der Kraftleitungsfunktion, wobei in beiden Fällen die verfahrensinduzierten Eigenschaften des Spaltprofilierens gezielt zur Funktionserfüllung eingesetzt wurden. In der in Abbildung 35 dargestellten Gesamtlösung kann jedoch zusätzlich eine Funktionserweiterung umgesetzt werden, da die spaltprofilierten Flansche, die eine Schnappverbindung realisieren, zugleich die notwendigen verfahrensinduzierten Eigenschaften für die Realisierung einer Führung bereitstellen. Die Kombination beider fertigungsintegrierenden Funktionsträger führt zur Funktionserweiterung um eine zusätzliche Funktion in der Gesamt-

lösung. Gleichzeitig entfallen in dieser Kombination die Notwendigkeit des Einbringens zusätzlicher HSC-Formelemente (Technologieintegration) und das Verwenden zusätzlicher Schrauben (Entwicklung einer integralen Baustruktur).

4.3 Werkzeuge für die fertigungsgetriebene Funktionsintegration

Die in den Abschnitten 4.1 und 4.2 diskutierte Verknüpfung geeigneter Modelle für die Funktionsintegration ermöglicht die Entwicklung geeigneter modellbasierter Werkzeuge. In diesem Abschnitt werden mit der *Design Pattern Matrix* (DPM) und den *Process Integrated Design Guidelines* (PIDG) zwei Werkzeuge vorgestellt, die sich zur Unterstützung der Funktionsintegration im Rahmen fertigungsgetriebener Entwicklungsprojekte eignen.

Als illustrierendes Beispiel soll hierbei ein Linearsystem mit spaltprofilierten Führungsflächen für den Einsatz in Fassadenreinigungssystemen betrachtet werden, welches im Rahmen des SFB 666 entwickelt wurde.¹⁹¹ Die Führungsschiene des Fassadenreinigers sollte dabei als integrales spaltprofiliertes Bauteil ausgelegt werden, das neben der Führungsfunktion auch zusätzliche Funktionen zu erfüllen hat. Abbildung 36 zeigt das hergestellte Profil, sowie die restlichen Komponenten des Fassadenreinigers wie Schlitten und Wischerelemente.

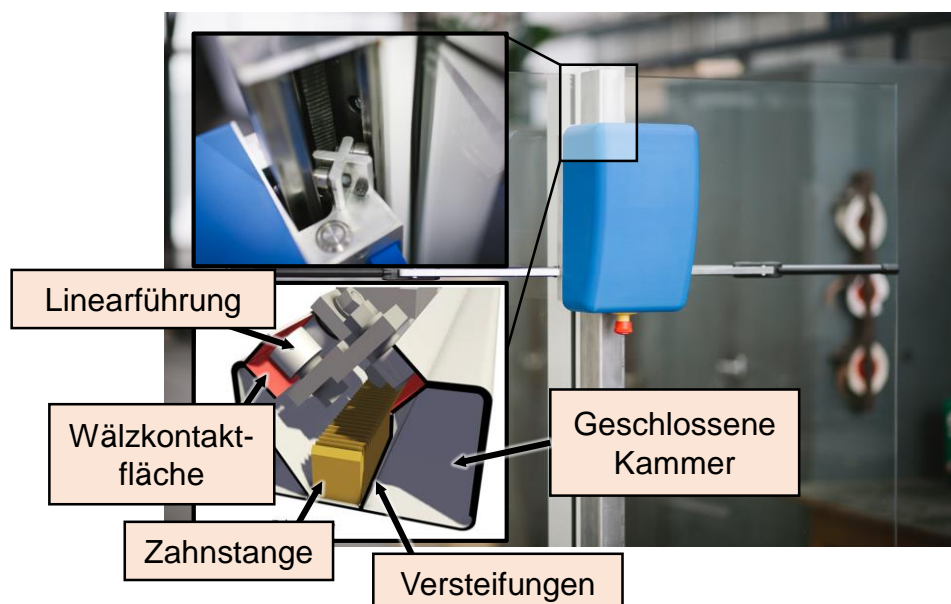


Abbildung 36: Spaltprofilierte Linearführung als Antriebssystem für Fassadenreiniger¹⁹²

¹⁹¹ Vgl. Roos et al. (2017c), S. 330.

¹⁹² In Anlehnung an Wagner et al. (2015), S. 87.

Zusätzlich zur Spaltprofilertechnologie wurden weitere Fertigungstechnologien, die sich mit dem Spaltprofilieren in einer kontinuierlichen Fließfertigung kombinieren lassen, als Ausgangspunkt der fertigungsgetriebenen Entwicklung gewählt: Walzprofilieren, Spaltbiegen, HSC-Bearbeitung und Laser-Schweißen.¹⁹³ In Kombination sind diese Fertigungstechnologien geeignet, um komplexe Profilgeometrien wie in Abbildung 36 dargestellt in Integralbauweise zu fertigen.

4.3.1 Design Pattern Matrix als Werkzeug für fertigungsgetriebene Funktionsintegration

In der DPM werden in Form einer Matrix die verfahrensinduzierten Gestaltelemente und zugehörigen Eigenschaften den Funktionsträgern und funktionsrelevanten Eigenschaften gegenübergestellt, wie in Abbildung 37 dargestellt.¹⁹⁴

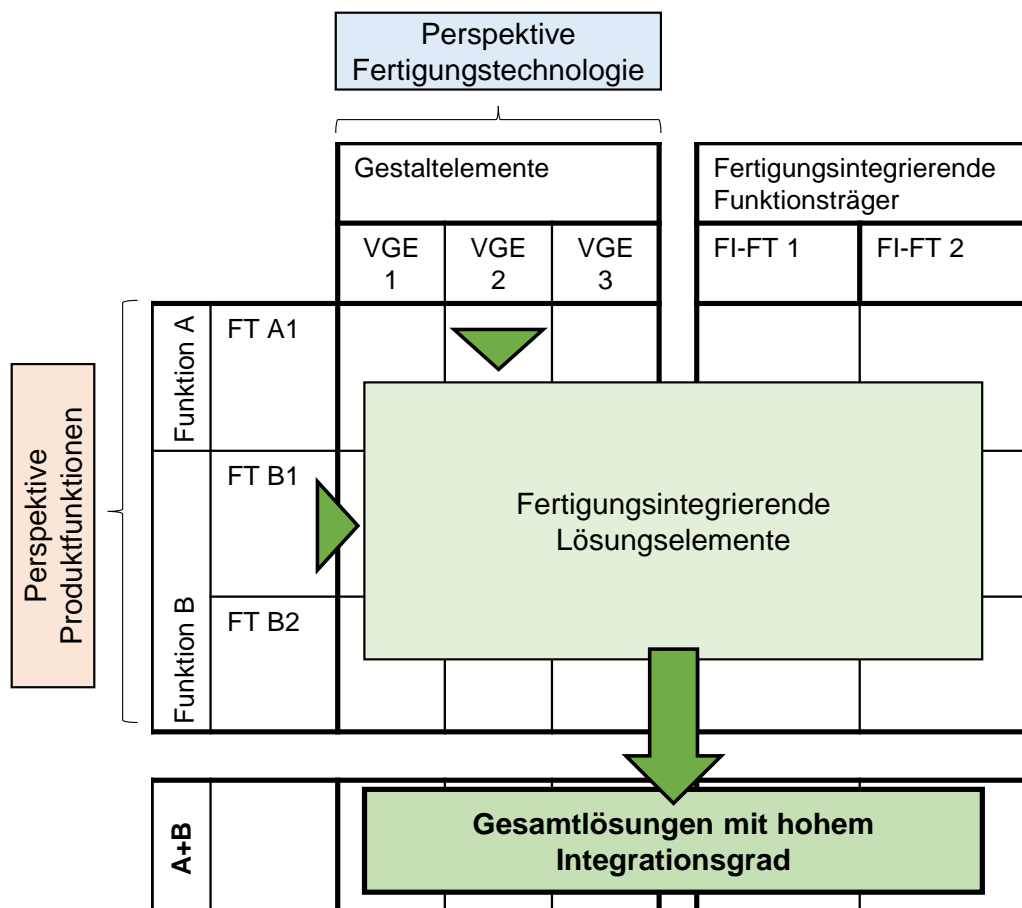


Abbildung 37: Grundgerüst der DPM

¹⁹³ Vgl. Roos et al. (2017c), S. 312f.

¹⁹⁴ Vgl. Wagner et al. (2017), S. 280 - 285; Roos et al. (2017a), S. 16 - 18. Ein exemplarisches Formblatt für die DPM findet sich in Anhang A.

Diese Gegenüberstellung unterstützt bei der Entwicklung sogenannter *fertigungs-integrierender Design Patterns*, die in die Schnittpunkte zwischen Gestaltelement und Funktionsträger eingetragen werden. Fertigungsintegrierende Design Patterns stellen allgemeingültige Lösungselemente dar, die sich aus einem Modell, wie beispielsweise einer graphischen Repräsentation des Lösungselements, sowie den zugrundeliegenden Eigenschaftsrelationen zusammensetzen.¹⁹⁵ Die hierfür notwendige Eigenschaftsrelation ergibt sich durch die Betrachtung der funktionsrelevanten Eigenschaften eines Funktionsträgers und der bereitgestellten verfahrensinduzierten Eigenschaften der Fertigungstechnologie. Auf Basis dieser Eigenschaftsrelationen werden Lösungselemente, in denen die verfahrensinduzierten Eigenschaften gezielt zur Realisierung der für die Funktionserfüllung notwendigen funktionsrelevanten Eigenschaften eingesetzt werden, in den Zellen der DPM dokumentiert. In der DPM finden sich also mit Funktionsträgern und verfahrensinduzierten Gestaltelementen der betrachteten Fertigungstechnologien die gleichen Modellelemente wieder, die auch für die Modellierung der Integrationsstrategien verwendet werden.¹⁹⁶ Um den Ansatz zur fertigungsgetriebenen Funktionsintegration gezielt zu unterstützen, wird der Aufbau der DPM erweitert, um auch die für die Funktionsintegration notwendigen Kombinationen unterschiedlicher Funktionsträgervarianten abbilden zu können.

Den Ausgangspunkt für die Entwicklung der Linearführung stellt eine kontinuierliche Fließfertigung zur Herstellung verzweigter Blechstrukturen dar. Neben den Kaltumformverfahren Spaltprofilieren, Walzprofilieren und Spaltbiegen sind in dieser Fließfertigung auch Fertigungstechnologien wie HSC-Bearbeitung und Laserschweißen in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess integriert. Die von diesen Fertigungstechnologien bereitgestellten verfahrensinduzierten Gestaltelemente und Eigenschaften stellen die Spaltenüberschriften der DPM dar. Eine Analyse von Referenzprodukten, wie beispielsweise eine spaltprofilierte Linearführung mit integrierter Bremsfunktion¹⁹⁷, oder der Einsatz einer „Verfahrensmatrix“¹⁹⁸, in der graphisch repräsentierte Formelemente verschiedener Fertigungsverfahren gegenübergestellt werden, helfen bei der Dokumentation der verfahrensinduzierten

¹⁹⁵ Vgl. Roos (2018), S. 89.

¹⁹⁶ Siehe Abschnitt 4.1.

¹⁹⁷ Vgl. Lommatzsch et al. (2011a), S. 339 - 345; Lommatzsch et al. (2011b), S. 442 - 445.

¹⁹⁸ Vgl. Fritz, Schulze (2015), S. 337.

Gestaltelemente. Erfordert die Realisierung eines Funktionsträgers Zulieferkomponenten außerhalb der betrachteten Fertigungstechnologien, werden diese in zusätzlichen Spalten aufgeführt, wie in Abbildung 38 dargestellt.

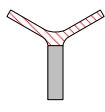
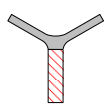
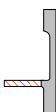
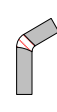
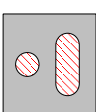

Kontinuierliche Fließfertigung					Zukauf
Spaltprofilieren		SpaBi	WaP	HSC	Zahnstange
					

Abbildung 38: Auszug aus der Fertigungszeile der DPM: Relevante Fertigungstechnologien für die Entwicklung einer spaltprofilierten Linearführung für das Antriebssystem eines Fassadenreinigers

Im gezeigten Beispiel sind die Fertigungstechnologien einer kontinuierlichen Fließfertigung gruppiert. Dadurch können Fertigungstechnologien, die nicht kompatibel mit der kontinuierlichen Fließfertigung sind, einfach erkannt werden. Bei einer späteren Auswahl notwendiger Fertigungstechnologien zur Realisierung des Produkts können somit Technologien identifiziert werden, deren Einsparung sich unter Umständen besonders lohnt. Bei der Darstellung der zur Verfügung stehenden verfahrensinduzierten Gestaltelemente können an dieser Stelle bereits Hinweise aus etablierten fertigungsspezifischen Gestaltungsrichtlinien und Gut/Schlecht-Beispielen wie sie etwa in den Richtlinien zu „Blechgerechte[m] Gestalten“¹⁹⁹ zu finden sind²⁰⁰, berücksichtigt werden. Auch Erfahrungen aus dem vorherigen Einsatz der betrachteten Fertigungstechnologien sollten in die Darstellungen mit einfließen, um durch die Visualisierung eine möglichst fertigungsgerechte Gestaltung zu unterstützen.

In der Zeile unterhalb der identifizierten verfahrensinduzierten Gestaltelemente werden die zugehörigen verfahrensinduzierten Eigenschaften festgehalten. Dadurch kann die DPM auch als Wissensspeicher genutzt werden. Viele verfahrensinduzierte Eigenschaften können fertigungsbedingt jedoch nur einen bestimmten Wertebereich annehmen, wie beispielsweise der Winkel der Biegung eines gebogenen Profils, der abhängig ist von möglichen Biegeradien, die durch die

¹⁹⁹ Vgl. Heusel, Bronnhuber (2013), S. 622 - 647.

²⁰⁰ Siehe Abschnitt 2.2.

verwendete Fertigungstechnologie bzw. das eingesetzte Werkzeug vorgegeben sind.²⁰¹ Die Angabe solcher möglichen Wertebereiche in den Spaltenüberschriften der DPM erlaubt – neben der schnellen Sichtbarkeit möglicher Potentiale der Fertigungstechnologie für die Gestaltung mithilfe bereitgestellter verfahrensinduzierter Gestaltelemente – auch gleichzeitig die frühzeitige Berücksichtigung möglicher Fertigungsrestriktionen.

Für das spaltprofilierte Linearsystem zum Einsatz in einem Fassadenreiniger stellen Führung, Wälzkontaktfläche, Antrieb, Energieversorgung und Reinigungsmittelversorgung wesentliche Funktionen dar.²⁰² Die zu diesen Funktionen passenden Funktionsträger können hierbei durch den Einsatz etablierter Lösungfindungsmethoden ermittelt und zusammen mit ihren funktionsrelevanten Eigenschaften in die Zeilenköpfe der DPM eingetragen werden, wie in Abbildung 39 rechts dargestellt.

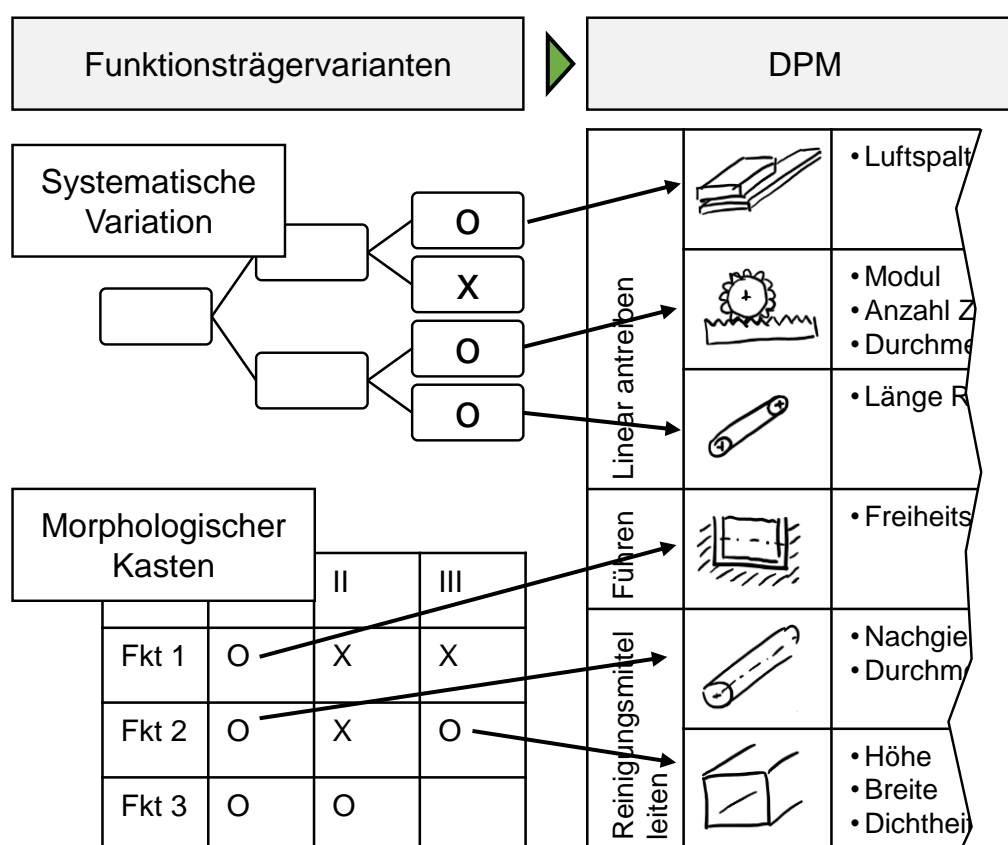


Abbildung 39: Ausschnitt aus der Funktionsseite der DPM für das Antriebssystem eines Fassadenreinigers

²⁰¹ Siehe Abschnitt 4.1.1.

²⁰² Vgl. Roos et al. (2017c), S. 309.

Die Anwendung einer systematischen Variation führt zu einem breiten Lösungsfeld, dessen Varianten in einem morphologischen Kasten festgehalten werden. Aus dem morphologischen Kasten werden diejenigen Funktionen ausgewählt, die für die Betrachtung im Hinblick auf mögliche Funktionsintegration vielversprechend erscheinen. Sie werden in die Zeilen der DPM übertragen.

Insbesondere bei einer großen Anzahl an Funktionsträgern und Gestaltelementen kann an dieser Stelle eine MIPM²⁰³ angewendet werden, um den Aufwand des folgenden Element-Abgleichs zu verringern. Dazu werden die dokumentierten Eigenschaften gegenübergestellt und untersucht, ob die funktionsrelevanten Eigenschaften grundsätzlich durch verfahrensinduzierte Eigenschaften realisiert werden können. Funktionsträgervarianten, deren relevante Eigenschaften sich durch kein Gestaltelement realisieren lassen, können an dieser Stelle bereits gestrichen werden, da dadurch bereits offenbar wird, dass die Funktionsträger nicht kompatibel mit den betrachteten Fertigungstechnologien sind. Genauso können Gestaltelemente aus der DPM gestrichen werden, die keinerlei verfahrensinduzierte Eigenschaften aufweisen, die die ermittelten Funktionsträger realisieren könnten.

Die erfassten verfahrensinduzierten Gestaltelemente und die erarbeiteten Funktionsträger bilden die Zeilen- und Spaltenüberschriften der DPM. In den Zellen, die die Schnittpunkte dieser Überschriften bilden, werden aus den zunächst fertigungsunabhängigen allgemeingültigen Funktionsträgern durch Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden verfahrensinduzierten Gestaltelemente fertigungsintegrierende Lösungselemente entwickelt. Die fertigungsintegrierenden Lösungselemente werden bildhaft in der Zelle des jeweiligen Schnittpunkts zwischen Funktionsträger und verfahrensinduziertem Gestaltelement festgehalten. Dabei stellt die DPM ein Werkzeug zur geführten Kreativität dar: Das Gegenüberstellen der Funktionsträger und der verfahrensinduzierten Gestaltelemente schafft ein Bewusstsein für die Möglichkeiten der Fertigungstechnologien zur Gestaltung des Produkts und unterstützt damit bei einer Konkretisierung insbesondere den Übergang von der prinzipiellen Ebene zur Ebene der Gestalt – schließlich sind verfahrensinduzierte Gestaltelemente stets Elemente auf Gestaltebene, während die entwickelten Funktionsträger je nach Bedarf auf auch abstrakteren Konkretisierungsebenen angesiedelt sein können.

²⁰³ Siehe Abschnitt 2.3.4.

Abbildung 40 zeigt einen Ausschnitt aus der DPM für das betrachtete Linearsystem, in dem Funktionsträger für die Führungsfunktion und für die Bereitstellung einer Wälzkontaktfläche sowie die Gestaltelemente des Spaltprofilierens dargestellt sind.

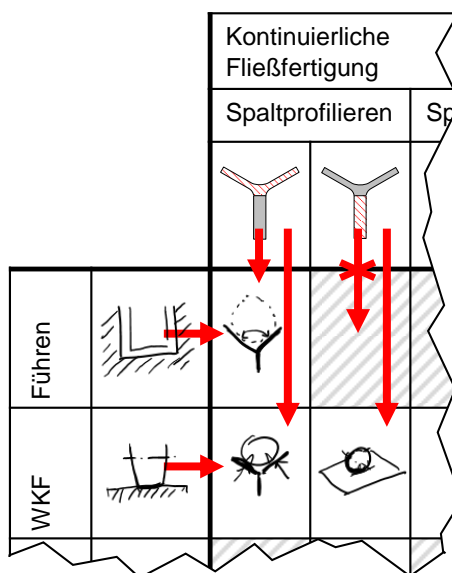


Abbildung 40: Ausfüllen der Zellen in der DPM

Beim Betrachten der Schnittpunkte zwischen Funktionsträgern und verfahrensinduzierten Gestaltelementen finden sich nicht zwangsläufig für alle Schnittpunkte Lösungen. Beispielsweise lässt sich mithilfe des Stegs eines spaltprofilierten Blechs kein Funktionsträger für die Führungsfunktion realisieren, da die vom Steg bereitgestellten verfahrensinduzierten Eigenschaften nicht kompatibel zu den funktionsrelevanten Eigenschaften einer Führung sind (gesperzte Freiheitsgrade). Für andere Funktionsträger finden sich wiederum mehrere verschiedene Lösungselemente, die unterschiedlichen verfahrensinduzierten Gestaltelementen zugrunde liegen. Im Beispiel des Antriebssystems für Fassadenreiniger können mögliche Funktionsträger zur Realisierung der Linearführungsfunktion mit den von der Spaltprofilierertechnologie realisierten Flanschen verknüpft werden. Spaltprofilierte Flansche, deren Oberfläche als Wälzkontaktfläche in einer Linearführung eingesetzt werden, stellen damit einen fertigungsintegrierenden Funktionsträger der Funktion „Linear führen“ dar. Die für die Führung funktionsrelevanten Eigenschaften, wie die Sperrung von Freiheitsgraden oder die Oberflächenbeschaffenheit, können durch die Geometrie der Flansche sowie deren charakteristisches UFG-Gefüge bereitgestellt werden.

Die Realisierung eines Funktionsträgers kann auch die Verknüpfung unterschiedlicher verfahrensinduzierter Gestaltelemente erfordern, die unter Umständen auch durch unterschiedliche Fertigungstechnologien bereitgestellt werden. Die Zellen beinhalten damit Lösungselemente, die eine Teilmenge der erforderlichen funktionsrelevanten Eigenschaften erfüllen, in Kombination jedoch eine Möglichkeit zur Realisierung des entsprechenden Funktionsträgers darstellen. Damit stellen die einzelnen verfahrensinduzierten Gestaltelemente eine Teilmenge an notwendigen verfahrensinduzierten Eigenschaften bereit, sowie unter Umständen auch vom Funktionsträger nicht benötigte Eigenschaften. Wird eine solche Kombination an dieser Stelle bereits erkannt, so kann dieses kombinierte verfahrensinduzierte Gestaltelement – welches dadurch zu einem verfahrensinduzierten Gestaltelement einer Verfahrenskette wird²⁰⁴ – in einer weiteren Spalte ebenfalls aufgeführt werden. Eine hohe Anzahl ungenutzter verfahrensinduzierter Eigenschaften eines Gestaltelements bei Betrachtung des Gesamtprodukts kann ein Indiz dafür sein, dass sich das Gestaltelement durch eine unnötig hohe Komplexität auszeichnet.

Für die Funktion „Fluide leiten“ kann beispielsweise eine geschlossene Kammer verwendet werden. Funktionsrelevante Eigenschaften sind in diesem ein bereitgestelltes Volumen sowie die Dichtheit der Kammer. Eine Möglichkeit zur Herstellung einer Kammer stellt der Einsatz des Walzprofilierens zur Umformung des Blechprofils in die gewünschte Geometrie dar. Auch das Spaltbiegen erlaubt bei entsprechenden Flanschlängen die Realisierung eines Mehrkammerprofils. Die Dichtheit der Kammer ist damit jedoch noch nicht gewährleistet und wird erst durch einen dem Walzprofilieren nachgelagerten Schweißprozess erreicht. In einer zusätzlichen Lösungsspalte, wie in Abbildung 41 dargestellt, werden die Lösungselemente zu einem fertigungsintegrierenden Funktionsträger kombiniert.

²⁰⁴ Vgl. Gramlich (2013), S. 103.

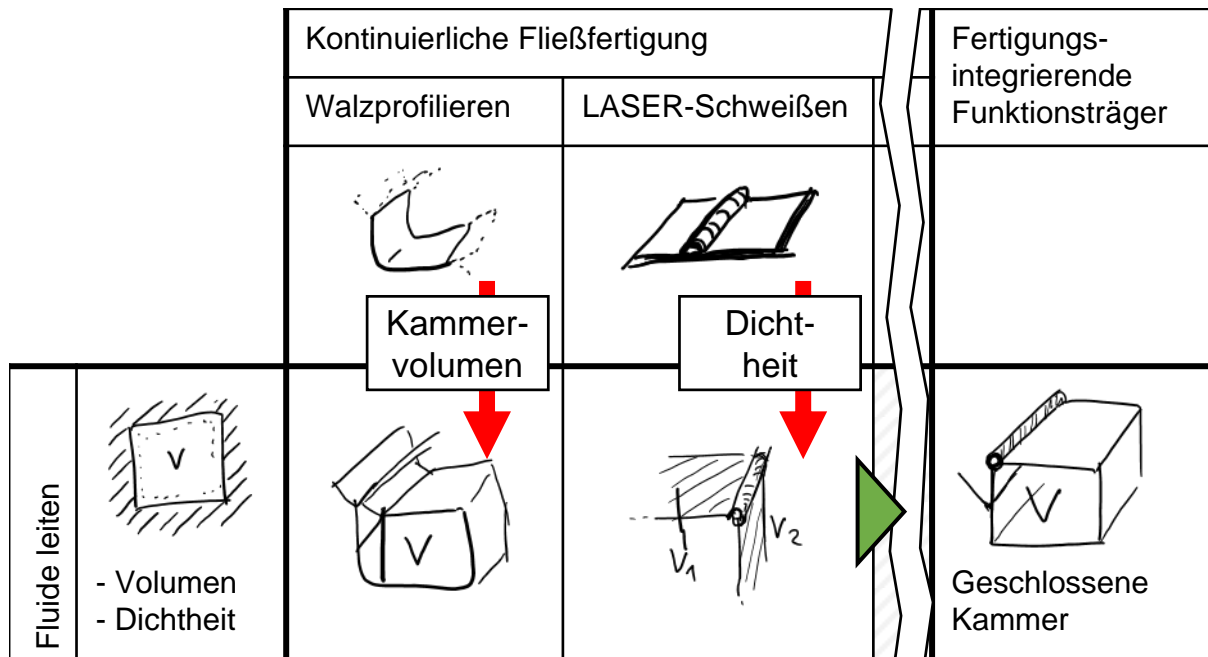


Abbildung 41: Lösungsspalte der Gestaltelement-Kombinationen

Im nächsten Schritt werden die erarbeiteten fertigungsintegrierenden Funktionsträger, die potentielle Lösungselemente einer Gesamtlösung darstellen, unter Berücksichtigung der Integrationsstrategien zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt.

Die kombinierte Gesamtlösung muss in der Lage sein, alle in der DPM betrachteten Funktionen bereitzustellen. Dazu werden in der DPM gezielt diejenigen verfahrensinduzierten Gestaltelemente gesucht, mit deren Hilfe sich verschiedene Funktionen realisieren lassen. Zur besseren Übersicht werden in zusätzlichen Zeilen unter der DPM Funktionskombinationen betrachtet, wie in Abbildung 42 dargestellt. In den diesen Zeilen zugeordneten Lösungsspalten werden die vorher erstellten Skizzen hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur gleichzeitigen Realisierung verschiedener Funktionen ergänzt. Die Anwendung der Integrationsstrategien²⁰⁵ unterstützt die Auswahl geeigneter verfahrensinduzierter Gestaltelemente zur Realisierung der Produktfunktionen.

Abbildung 42 verdeutlicht, wie aus den entwickelten fertigungsintegrierenden Funktionsträgern unterschiedliche Gesamtlösungen kombiniert werden können. Dabei werden die zugehörigen fertigungsintegrierenden Lösungselemente in der zur Kombination gehörigen Zeile von oben ergänzt und die Skizze bei Bedarf

²⁰⁵ Siehe Abschnitt 4.1.1 bis 4.1.3.

weiterentwickelt. Die blau markierten Zellen stellen identifizierte fertigungsintegrierende Lösungselemente dar, die sich, abhängig von der gewählten Funktionsträgerkombination, auch in den unteren Funktions-Kombinations-Zeilen wiederfinden. Folgt man der Funktionsträgerkombination, die durch den roten Pfeil gekennzeichnet ist, so erkennt man, dass die Gesamtlösung die Realisierung der verfahrensinduzierten Gestaltelemente VGE 1, VGE 2 und VGE 4 notwendig macht. Dies liegt darin begründet, dass die dieser Gesamtlösung zugrundeliegenden Funktionsträger der einzelnen Funktionen mithilfe dieser Gestaltelemente realisiert werden. Der blaue und der orangefarbene Pfad zeigen, wie die Entwicklungen der Gesamtlösungen in Zwischenschritte und Zwischenlösungen unterteilt werden können, was die Erarbeitung mitunter vereinfacht. Weiterhin entstehen dabei Gesamtlösungen für eine andere Funktionskombination. Folgt man dem blauen Pfad, so wird hier durch die Kombination zweier Funktionsträger der Funktionen B und C eine Gesamtlösung entwickelt, die nur diese beiden Funktionen bereitstellen kann (Kreis mit blauen Streifen). Durch Kombination dieser Gesamtlösung mit einer fertigungsintegrierenden Funktionsträgervariante der Funktion A wird eine Gesamtlösung geschaffen, die alle geforderter Funktionen realisieren kann (kariierter Kreis).

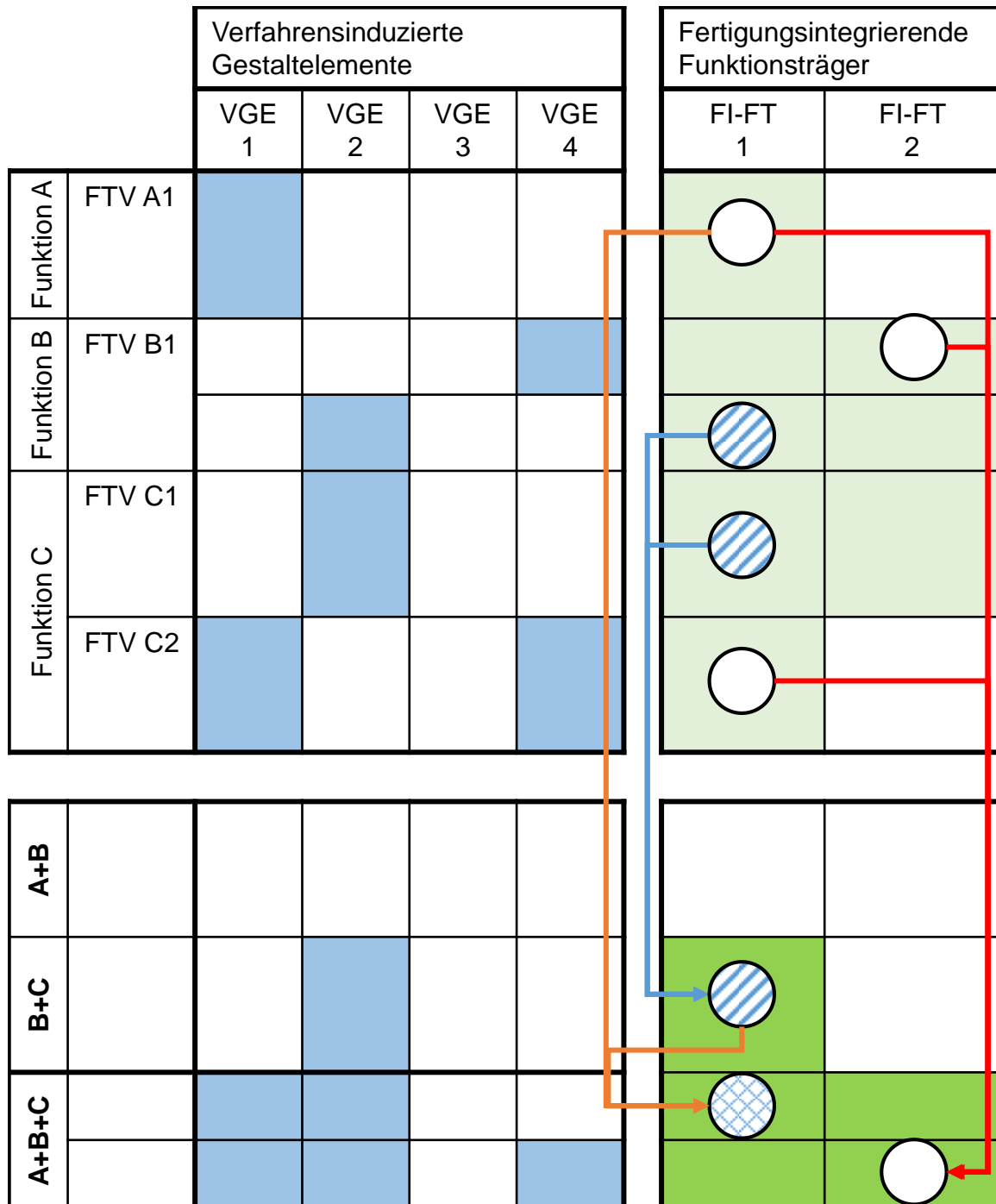


Abbildung 42: Kombination der fertigungsintegrierenden Funktionsträger in der DPM

Durch eine zeilenweise Betrachtung der notwendigen verfahrensinduzierten Gestaltelemente zur Realisierung eines Funktionsträgers können gezielt Lösungselement-Kombinationen identifiziert werden, die mit nur wenigen verschiedenen verfahrensinduzierten Gestaltelementen zu realisieren sind. Die Gruppierung von Fertigungstechnologien, die auch in Kombination die Fertigung integraler Bauteile erlauben, wie das bei den Technologien der kontinuierlichen Fließfertigung des

SFB 666 der Fall ist, hilft bei der Entwicklung von Lösungen in integraler Baustruktur.

Im Beispiel der in Abbildung 36 dargestellten Linearführung des Antriebssystems für Fassadenreiniger ist eine Umsetzung der Integrationsstrategien an verschiedenen Stellen zu erkennen. Die Nutzung von spaltgebogenen Flanschen, die als Verzweigungen im Blechprofil nicht nur die Steifigkeit des Gesamtsystems erhöhen, sondern auch die Bildung von Kammern ermöglichen, zeigt die Umsetzung einer Funktionserweiterung. Anstatt auf Lösungen wie beispielsweise Profilschienenführungen zurückzugreifen, sind spaltprofilierte Flansche als Wälzkontaktflächen gewählt. Der Funktionsträger Führung kann somit nur durch Gestaltelemente einer einzigen Fertigungstechnologie bereitgestellt werden, die nachgelagerte Oberflächenbearbeitungsprozesse nicht notwendig macht. Technologieintegration zeigt sich im Einsatz eines prozessintegrierten Fügeprozesses zur Befestigung einer Zahnstange, die die Antriebsfunktion realisiert.²⁰⁶ Durch das Spaltprofilieren kommt es zu Eigenspannungen im Stegbereich, die genutzt werden können, um zusätzliche Elemente in vorher eingebrachten HSC-Bohrungen zu fügen. Eine Zahnstange kann somit als zusätzlicher Funktionsträger eingebracht werden und macht damit zusätzliche, der kontinuierlichen Fließfertigung nachgelagerte, Fügeprozesse überflüssig. Eine weitere Steigerung des Integrationsgrads kann erzielt werden, indem anstelle einer gefügten Zahnstange mithilfe von HSC-Bearbeitung die für die Antriebsfunktion erforderlichen Zähne direkt in den Stegbereich des Spaltprofils eingebracht werden.

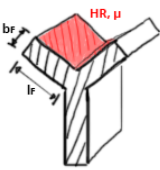
4.3.2 Projektübergreifender Erkenntnispeicher: Katalogisierung mithilfe Process-integrated Design Guidelines

Die DPM eignet sich aufgrund ihres Aufbaus bereits als Dokumentationsform für fertigungsintegrierende Lösungselemente, verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Funktionsträger. Um den Zugriff auf diese Erkenntnisse auch in zukünftigen Projekten zu erleichtern, kommt die Dokumentation in Form sogenannter *Process Integrated Design Guidelines* (PIDG) zur Anwendung. PIDG sind zusammengesetzt aus einem konkreten Gestaltungshinweis, der auf einer Verknüpfung von

²⁰⁶ Vgl. Wagner et al. (2015), S. 85 - 88; Wagner et al. (2017), S. 290 - 296.

verfahrensinduzierten Eigenschaften und funktionsrelevanten Eigenschaften eines Funktionsträgers basiert, dessen Erklärung sowie Gestaltungsvorbilder.²⁰⁷ Tabelle 4 stellt zwei exemplarische PIDG für die Funktionen „Linear führen“ und „Wälzkontaktfläche bereitstellen“ dar. Weitere Beispiele finden sich in Anhang B.

Tabelle 4: Exemplarische PIDG für Führung und Wälzkontaktfläche

Funktion	PIDG	Gestaltungshinweis	Erklärung	Referenz
Linear führen	PIDG 1: Spaltprofilierte Flansche als Führung	Nutze spaltprofilierte Flansche mit definiertem Öffnungswinkel als Leit- arführung mit gesperrten Freiheitsgraden .	Blechkanten werden beim Spaltprofilieren an Bandkanten in Flansche geformt. ²⁰⁸	
Wälzkontaktfläche bereitstellen	PIDG 2: Flansch- oberflä- che als Wälzkon- taktfläche	Nutze die Oberfläche von spaltprofilierten Flanschen mit UFG-Gefüge zur Bereitstellung von Wälzkontaktflächen mit hoher Härte, Oberflächengüte und erreichbarer Lebensdauer .	UFG-Gefüge weist hohe Härte und geringe Oberflächenrauheit auf. ²⁰⁹	

Der in den PIDG hinterlegte Gestaltungshinweis baut dabei auf den gleichen Modellelementen auf, die auch in der DPM eine zentrale Rolle spielen: Verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Eigenschaften, sowie Funktionsträger und funktionsrelevante Eigenschaften einer bestimmten Funktion. In PIDG wird dokumentiert, wie die Beeinflussung einer verfahrensinduzierten Eigenschaft (also einer unabhängigen Eigenschaft²¹⁰) einen gewinnbringenden Einfluss auf eine funktionsrelevante Eigenschaft eines Funktionsträgers (in Form einer abhängigen Eigenschaft²¹¹) haben kann. PIDG stellen somit eine geeignete Dokumentationsform für die in der DPM entwickelten fertigungsintegrierenden Funktionsträger dar, in deren Erarbeitung die gleichen Eigenschaftsrelationen eingeflossen sind.

Damit PIDG zur Unterstützung der Funktionsintegration eingesetzt werden können, müssen gezielt mehrere kompatible PIDG ausgewählt und in einer Lösung

²⁰⁷ Vgl. Wagner et al. (2016), S. 740ff.

²⁰⁸ Vgl. Neuwirth et al. (2017), S. 32 - 34.

²⁰⁹ Vgl. Ahmels et al. (2017), S. 111.

²¹⁰ Vgl. Wäldele (2012), S. 56 - 62.

²¹¹ Vgl. Wäldele (2012), S. 63.

umgesetzt werden. Beide in Tabelle 4 aufgeführten PIDG basieren auf der Nutzung des gleichen verfahrensinduzierten Gestaltelements, obwohl unterschiedliche verfahrensinduzierte Eigenschaften zur Realisierung zweier verschiedener Funktionen genutzt werden. Die Nutzung gleicher verfahrensinduzierter Gestaltelemente für verschiedene Funktionen unterstützt die Integrationsstrategie Funktionserweiterung²¹², weswegen durch die gleichzeitige Umsetzung beider PIDG eine Funktionserweiterung gezielt umgesetzt werden kann. Die Nutzung von PIDG, die die Verwendung von verfahrensinduzierten Gestaltelementen empfiehlt, die bereits für andere Funktionsträger des zu entwickelnden Produkts genutzt werden, kann eine Technologie- bzw. Gestaltelementintegration²¹³ begünstigen.

Durch ihren Aufbau sind PIDG dazu geeignet, in beliebigen Datenbankumgebungen dokumentiert zu werden, so dass auf diese in Folgeprojekten zugegriffen werden kann, auch wenn die dokumentierten PIDG im aktuellen Projekt möglicherweise nicht umgesetzt worden sind. Durch die verwendeten Modelle, auf denen PIDG basieren, kann auf dokumentierte PIDG sowohl ausgehend von einer bestimmten Funktion als auch von einer bestimmten Fertigungstechnologie zugegriffen werden. Insbesondere im Rahmen eines fertigungsgetriebenen Entwicklungsvorhabens lohnt die Betrachtung der PIDG ausgehend von den verfahrensinduzierten Gestaltelementen der eingesetzten Fertigungstechnologie, um schnell mögliche Funktionen identifizieren zu können, die mithilfe dieser Technologie realisiert werden können. Verschiedene PIDG können auch hinsichtlich gleicher Funktionen bzw. Funktionsträgern untersucht werden. Damit kann gezielt nach verschiedenen Möglichkeiten zur Umsetzung bestimmter Funktionsträger gesucht werden, zunächst unabhängig von bestimmten Fertigungstechnologien.

Zur Vereinfachung der Recherche in einem PIDG-Katalog sind neben dem Zugriff über verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Funktionsträger auch verschiedene weitere Ordnungsschemata denkbar. So lassen sich die erfassten PIDG beispielsweise nach denkbaren Abmessungen gliedern. Für diese Abmessungen können wiederum die Wertebereiche der entsprechenden verfahrensinduzierten Geometrieigenschaften der betrachteten verfahrensinduzierten Gestaltelemente herangezogen werden.

²¹² Siehe Abschnitt 4.1.2.

²¹³ Siehe Abschnitt 4.1.1.

Der Formalismus der PIDG erlaubt damit im Vergleich zu klassischen Gestaltungsrichtlinien vielfältige Zugriffsmöglichkeiten auf die in ihr dokumentierten Gestaltungshinweise. Während beispielsweise Richtlinien zum gießgerechten Gestalten²¹⁴ als einzige Zugriffsmöglichkeit das verwendete Fertigungsverfahren aufweisen, kann auf PIDG zusätzlich auch über Funktionen oder spezifische Eigenschaften zugegriffen werden.

4.4 Fazit: Modelle und Hilfsmittel zur fertigungsgetriebenen Funktionsintegration

Die Entwicklung von Methoden zur Realisierung von Produktlösungen, in denen die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie zur Funktionsintegration umfassend ausgeschöpft werden, erfordert die Nutzung konsistenter Modelle, die gleichermaßen Aspekte der Fertigung und der Produktfunktion beschreiben können. Mithilfe von Funktionsträgern, verfahrensinduzierten Gestaltelementen und einer eigenschaftsbasierten Beschreibung wird diese Kompatibilität zwischen den Modellen der Produktfunktion und der Fertigungstechnologie sichergestellt. Auf Basis der gleichen Modellgrundlage konnten die einzelnen Bestandteile des in Kapitel 3 beschriebenen Integrationsgrads differenziert beschrieben und in einen Entwicklungsansatz implementiert werden.

Ausgehend von dem durch die Verwendung geeigneter Modellen unterstützten Verständnis konnte mit der DPM ein anwendbares Hilfsmittel zur Erweiterung des Lösungsraums um Lösungen mit hohem Integrationsgrad herausgearbeitet werden. Durch die Modellierung der Integrationsarten auf Basis kompatibler Modellelemente konnte gezeigt werden, dass die DPM in einer um Funktionsträger-Kombinationen erweiterten Form auch für die gezielte Entwicklung von Produkten mit hohem Integrationsgrad geeignet ist. Dabei sind die verwendeten Modelle allgemeingültig und die auf ihnen basierenden Integrationsstrategien dadurch für beliebige Funktionen und Fertigungstechnologien anwendbar. Die Einbeziehung von Funktionsträgern auf beliebigen Konkretisierungsstufen erlaubt die frühzeitige Berücksichtigung von Möglichkeiten zur Funktionsintegration. So können bereits Möglichkeiten zur Funktionsintegration auf Wirkprinzipiebene herausgearbeitet werden. Die Arbeit mit der DPM folgt dem Grundgedanken, wesentliche fertigungsbezogene Elemente zunächst zu identifizieren und anschließend mit Funktionsträgern zu verknüpfen. Die fertigungsbezogenen Elemente sind in Form von

²¹⁴ Vgl. Pahl et al. (2007), S. 445 - 468.

verfahrensinduzierten Gestaltelementen auf der Konkretisierungsebene der Gestalt, wodurch insbesondere der Übergang von Lösungsprinzipien hin zur konkreten Produktgestalt im Rahmen eines Produktentwicklungsprozesses gezielt unterstützt werden kann.

Die in der DPM verwendeten Modelle erlauben eine projektunabhängige Dokumentation der durch ihre Anwendung gewonnenen Erkenntnisse in Form von PIDG.²¹⁵ Bereits durch das Erfassen der relevanten verfahrensinduzierten Gestaltelemente im Rahmen der Arbeit mit der DPM wird ein Bewusstsein für die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie geschaffen, das für zukünftige Entwicklungsprojekte festgehalten und somit nutzbar gemacht werden kann. Die Erfassung möglicher Funktionsträger und ihrer funktionsrelevanten Eigenschaften stellt die Vorbereitung eines möglichen Lösungskatalogs dar: Für zukünftige Projekte kann auf diese Sammlung möglicher Funktionsträger, die spezifischen Funktionen zugeordnet sind, bereits zugegriffen, und diese im Folgenden bei Bedarf neu kombiniert werden.

Durch Anwendung der vorgestellten Hilfsmittel wird der verfügbare Lösungsraum um Lösungen erweitert, die sich durch einen hohen Integrationsgrad auszeichnen, welche ohne eine systematische Herangehensweise möglicherweise nicht erfasst worden wären. Die entwickelten Lösungen müssen im weiteren Entwicklungsprozess genau wie alle anderen erarbeiteten Lösungen einer Beurteilung unterzogen werden. Die entwickelten Varianten mit hohem Integrationsgrad stellen dabei aber hinsichtlich einer Aufwandsverringerung sowie der bereitgestellten Funktionalität vielversprechende Alternativen dar, indem in ihnen gezielt die Möglichkeiten fertigungsintegrierender Funktionsintegration verwirklicht sind.

²¹⁵ Vgl. Wagner et al. (2016), S. 742, 747.

5 Evaluation

In Kapitel 4 wurden Modelle und Hilfsmittel vorgestellt, die die Identifikation fertigungsintegrierender Lösungselemente sowie eine Kombination dieser Lösungselemente zu Gesamtlösungen mit hohem Integrationsgrad unterstützen. Der hohe Integrationsgrad stellt hierbei einen Indikator für das durch die entwickelten Lösungen geschaffene Innovationspotential dar. In diesem Kapitel wird ein beispielhaftes Vorgehen zur Operationalisierung des in Abbildung 34 dargestellten Ansatzes eingeführt, mit dem die vorgestellten Modelle und Hilfsmittel in einem konkreten Entwicklungsprojekt verwendet werden können. Als illustrierendes Beispiel dient hierfür in Abschnitt 5.1 die Synthese einer spaltprofilierten Linearführung mit hohem Integrationsgrad im Rahmen einer fertigungsgetriebenen Entwicklung. In Abschnitt 5.2 werden anhand der Analyse einer multifunktionalen Bajonett-schraube die Kompatibilität der verwendeten Modelle mit anderen Fertigungsverfahren überprüft, sowie auf Basis der Integrationsstrategien untersucht, welche fertigungsgetriebenen Fragestellungen zur Entwicklung einer solchen Schraube führen können.

5.1 Fallbeispiel: Vorspannungsintegration in spaltprofilierten Linearführungen

Anhand der fertigungsgetriebenen Entwicklung einer spaltprofilierten Linearführung mit hohem Integrationsgrad soll in diesem Abschnitt die Anwendbarkeit der in Kapitel 4 vorgestellten Modelle und Hilfsmittel überprüft werden. Im Mittelpunkt der Entwicklung steht die Nutzung der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen DPM zur Erweiterung des Lösungsraums um Lösungen, die sich durch einen hohen Integrationsgrad auszeichnen. Dafür wird das in den Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.4 beschriebene Vorgehen zur Implementierung der fertigungsgetriebenen Funktionsintegration in einen Entwicklungsprozess in einzelne geeignete Arbeitsschritte überführt, die in Tabelle 5 gemeinsam mit zweckmäßigen Hilfsmitteln, die die einzelnen Arbeitsschritte unterstützen, zusammengefasst sind.

Tabelle 5: Vorgehensschritte und zusätzliche Hilfsmittel

#	Bezeichnung	Zusätzliche Hilfsmittel
1	Festlegung Fertigungstechnologie	Eigenschaftsmapping ²¹⁶
2	Analyse Fertigungstechnologie	Prozessanalyse, verfahrensinduzierte Eigenschaften und Gestaltelemente ²¹⁷ ; PIDG ²¹⁸
3	Identifikation geeigneter Anwendungen	Experimentelle Untersuchungen, Prototypen, Simulationen
4	Festlegung Produktfunktionen	Analyse Referenzsysteme, QFD ²¹⁹ , Kano-Modell ²²⁰ , MIPM, Eigenschaftsmapping ²²¹
5	Identifikation Funktionsträger	Methoden zur Lösungsfindung (z.B. Systematische Variation)
6	Fertigungsintegration	DPM ²²² ; PIDG ²²³
7	Anwendung Integrationsstrategien	DPM ²²⁴ ; PIDG ²²⁵ ; Integrationsstrategien ²²⁶
(8)	Übergabe an den weiteren Entwicklungsprozess	Experimentelle Untersuchungen, Prototypen, Simulationen

Die in Tabelle 5 dargestellten Vorgehensschritte sind dabei an den Aufbau der DPM angepasst, so dass die Ergebnisse der Vorgehensschritte direkt in einer DPM erarbeitet und dokumentiert werden können. Abbildung 43 zeigt an einem Ausschnitt aus der in diesem Projekt entwickelten DPM, wie die Ergebnisse der einzelnen Vorgehensschritte zur Funktionsintegration in der DPM dokumentiert werden. Die Beschreibung dieses Entwicklungsprojekts gliedert sich in die einzelnen, in Tabelle 5 aufgeführten, Vorgehensschritte.

²¹⁶ Vgl. Gramlich (2013), S. 123ff.

²¹⁷ Vgl. Gramlich (2013), S. 91.

²¹⁸ Vgl. Wagner et al. (2016), S. 739 - 748; Abschnitt 4.3.2.

²¹⁹ Vgl. z.B. Pahl et al. (2007), S. 705 - 708.

²²⁰ Vgl. z.B. Gürtler, Lindemann (2016), S. 494f.

²²¹ Vgl. Gramlich (2013), S. 131ff.

²²² Siehe Abschnitt 4.3.1.

²²³ Vgl. Wagner et al. (2016), S. 739 - 748; Abschnitt 4.3.2.

²²⁴ Siehe Abschnitt 4.3.1.

²²⁵ Vgl. Wagner et al. (2016), S. 739 - 748; Abschnitt 4.3.2.

²²⁶ Siehe Abschnitt 4.2.4.

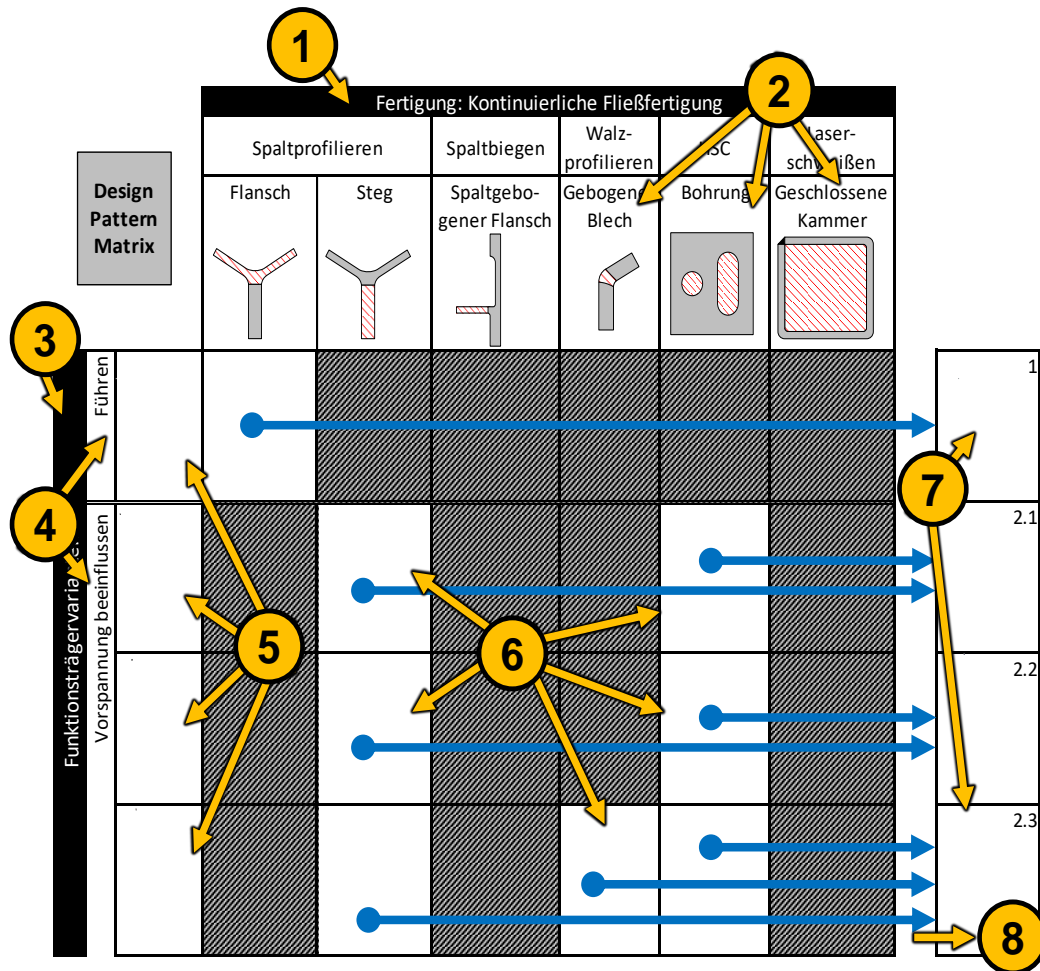


Abbildung 43: Abbildung der Vorgehensschritte in der DPM zur Erweiterung des Lösungsraums um Varianten mit hohem Integrationsgrad²²⁷

Schritt 1: Festlegung der Fertigungstechnologien

Der erste Schritt des Vorgehens sieht die frühzeitige Festlegung der betrachteten Fertigungstechnologien vor. Beim Spaltprofilieren können Werkstoffe mit hoher Härte verarbeitet werden, die durch die Bildung eines UFG-Gefüges noch an Festigkeit gewinnen und gleichzeitig eine geringe Oberflächenrauheit aufweisen – Eigenschaften, die für die Lebensdauer und die auftretende Reibung bei Linearführungen eine große Rolle spielen.²²⁸ GRAMLICH stellt mit dem Eigenschaftsmapping ein Hilfsmittel zur Auswahl geeigneter Fertigungstechnologien bereit.²²⁹ Abbildung 44 stellt das Mapping der verfahrensinduzierten Eigenschaften eines spaltprofilerten Flanschs den Eigenschaften einer Linearführung gegenüber.

²²⁷ In Anlehnung an Roos et al. (2017b), S. 275.

²²⁸ Vgl. Gramlich et al. (2015), S. 5.

²²⁹ Vgl. Gramlich (2013), S. 123ff.

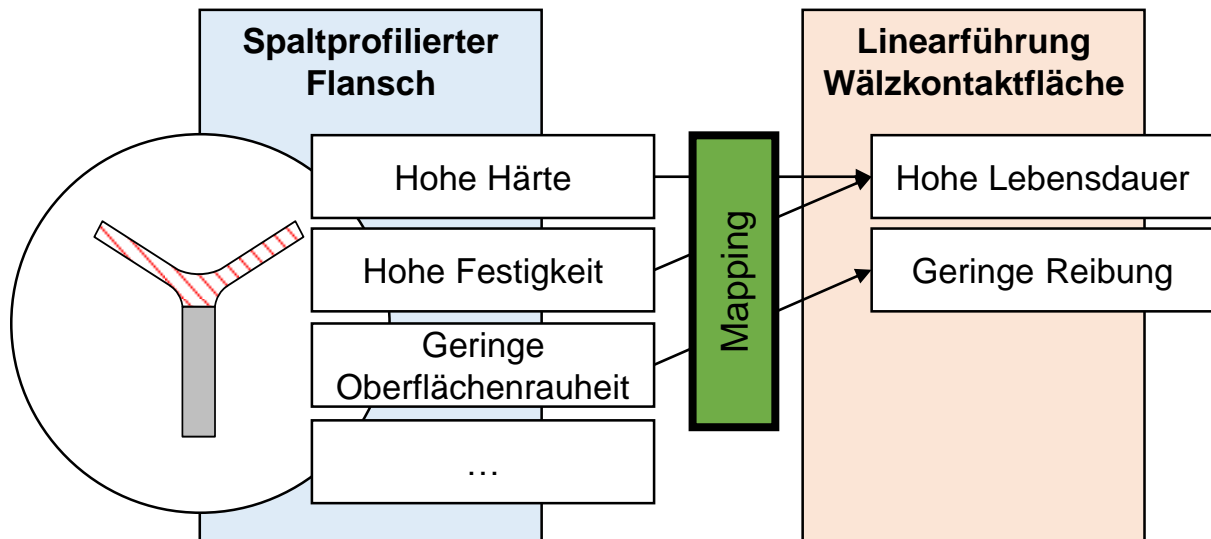


Abbildung 44: Eigenschaftsmapping zur Auswahl der Fertigungstechnologie

Die Spaltprofilierertechnologie kann in einer kontinuierlichen Fließfertigung mit verschiedenen anderen Fertigungstechnologien kombiniert werden, wie beispielsweise dem Walzprofilieren, dem Spaltbiegen, einer HSC-Bearbeitung von Blechen und dem Laser-Schweißen. In Kombination mit diesen Technologien stellt die kontinuierliche Fließfertigung eine Möglichkeit zur kostengünstigen Herstellung großer Stückzahlen von Blechprofilen dar. Durch den Einsatz verschiedener Umformtechnologien in der Fließfertigung lassen sich mehrfachverzweigte Blechstrukturen in Integralbauweise realisieren, deren komplexe Geometrie auch für die Integration zusätzlicher Funktionen genutzt werden kann.²³⁰ Damit unterstützt die Wahl dieser Fertigungstechnologie eine spätere Umsetzung der Strategie zur Erarbeitung einer integralen Baustruktur.²³¹ Die frühzeitige Festlegung auf bestimmte Fertigungstechnologien unterstützt dabei, im weiteren Entwicklungsverlauf gezielt die Besonderheiten und Möglichkeiten der betrachteten Technologien zu nutzen.

In der DPM werden die ausgewählten Technologien im Spaltenkopf dokumentiert und bei Bedarf im weiteren Verlauf der Entwicklung durch zusätzlich notwendige Fertigungstechnologien ergänzt.

²³⁰ Vgl. Groche et al. (2009), S. 712 - 720.

²³¹ Siehe Abschnitt 4.1.3.

Schritt 2: Analyse der Fertigungstechnologien

Die Fertigungsprozessanalyse einer Fertigungstechnologie erlaubt die Identifikation der für die Technologie charakteristischen Eigenschaften und Gestaltelemente.²³² Ausgehend von einer Analyse der im ersten Schritt festgelegten Fertigungstechnologien werden verfahrensinduzierte Gestaltelemente und zugehörige Eigenschaften identifiziert und damit der Entwicklung zur Verfügung gestellt. Abbildung 45 zeigt charakteristische verfahrensinduzierte Eigenschaften eines mithilfe der Spaltprofilierertechnologie hergestellten Flanschs.

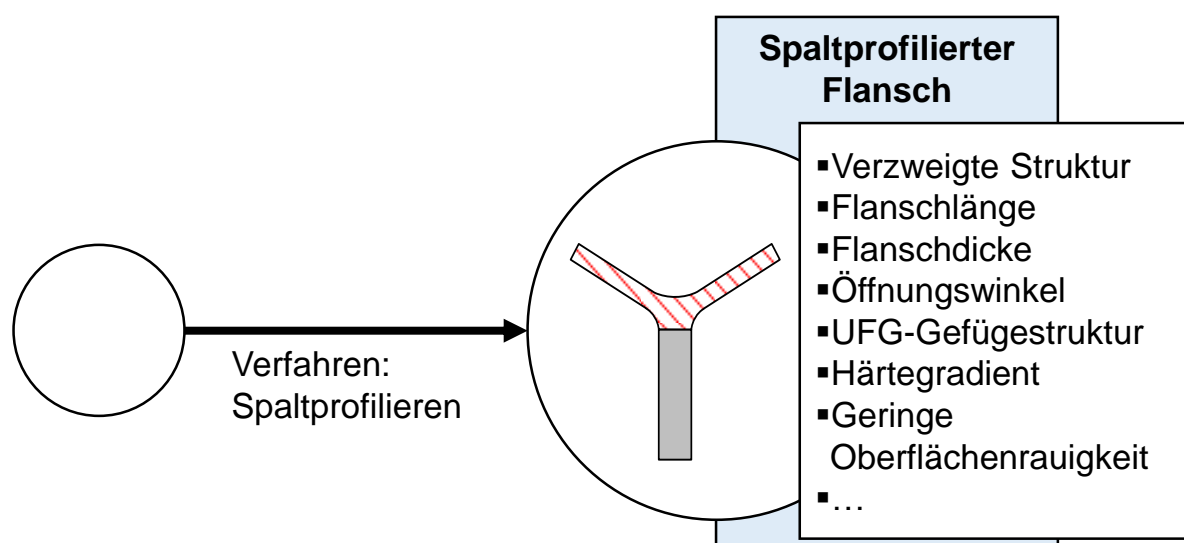


Abbildung 45: Verfahrensinduzierte Eigenschaften eines spaltprofilierten Flanschs²³³

Verfahrensinduzierte Gestaltelemente und Eigenschaften können für die Gestaltung des Produkts genutzt werden. Bei vorangegangenen Entwicklungen auf Basis der Spaltprofilierertechnologie, wie der Entwicklung einer Schnappverbindung²³⁴ eines Deckenkrans²³⁵ oder einer Linearführung²³⁶, wurden die bereitgestellten verfahrensinduzierten Eigenschaften bereits zur Realisierung relevanter Funktionsträger umgesetzt und dokumentiert. Erfahrungen aus vergangenen Projekten, in denen vergleichbare Fertigungstechnologien zum Einsatz gekommen sind, können somit aufgegriffen und genutzt werden. Insbesondere eine Dokumentation

²³² Siehe Abschnitt 4.2.1.

²³³ Vgl. Gramlich (2013), S. 91.

²³⁴ Vgl. Roos et al. (2016), S. 123 - 128.

²³⁵ Vgl. Gramlich et al. (2015).

²³⁶ Vgl. Karin et al. (2014), S. 123 - 132.

dieser Erfahrungen und Erkenntnisse auf Basis der zur Funktionserfüllung genutzten verfahrensinduzierten Eigenschaften und Gestaltelemente, wie die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen PIDG, erlaubt einen schnellen Zugriff auf relevante verfahrensinduzierte Eigenschaften und Gestaltelemente.

In der DPM werden die Gestaltelemente, gruppiert unter der Überschrift „Kontinuierliche Fließfertigung“ in die Spaltenüberschriften übertragen, wie in Abbildung 46 dargestellt.

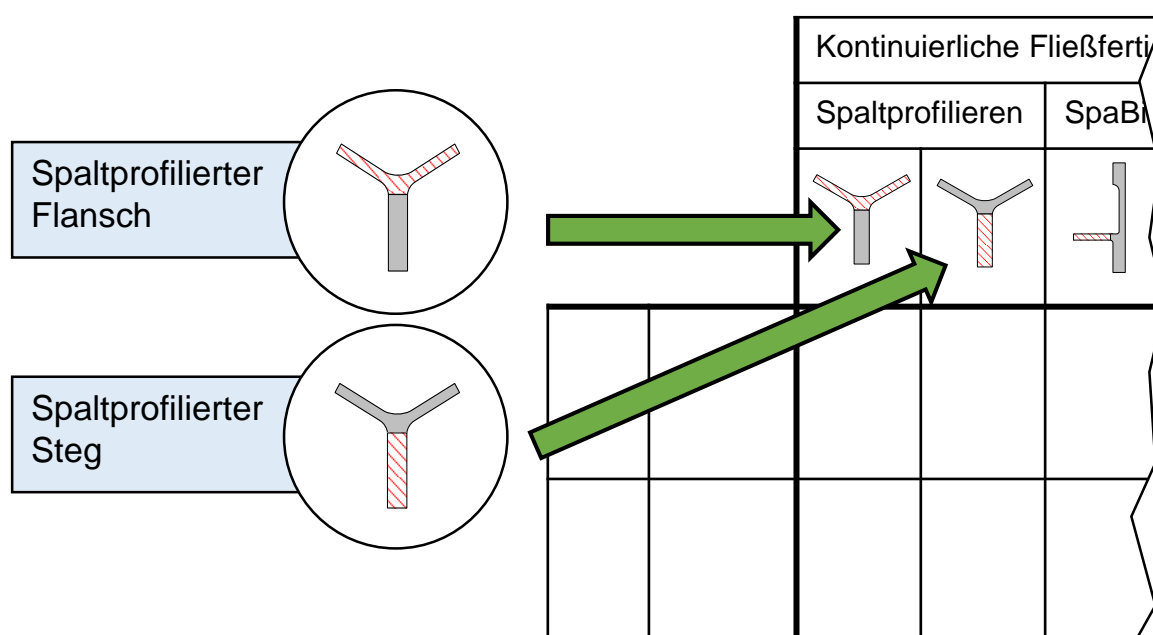


Abbildung 46: Ausfüllen der DPM-Spaltenüberschriften

Schritt 3: Identifikation geeigneter Anwendungen

Die in Schritt 2 identifizierte hohe Wälzfestigkeit der spaltprofilierten Linearführungen zeigt, dass sie für Anwendungen im Bereich der Lineartechnik grundsätzlich geeignet sind. Die Präzisierung dieser Anwendung erfordert jedoch weitere Untersuchungen der Auswirkungen der verfahrensinduzierten Eigenschaften des Spaltprofilierens auf den Nutzungsprozess.²³⁷ Für den Nutzungsprozess eines Linear-systems, das einen Schlitten von einer Startposition in eine Endposition bewegt, lassen sich beispielsweise Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit dieser Bewegung ableiten, die je nach Anwendungsszenario unterschiedlich hoch sein muss. So sind an Linearsystemen in einer Werkzeugmaschine deutlich höhere

²³⁷ Siehe Abschnitt 4.2.2.

Anforderungen hinsichtlich der Präzision der Bewegung gestellt als an Linearsysteme, die beispielsweise in einem Pick & Place-System oder in einem Garagentor verbaut werden. Mögliche Anwendungen einer spaltprofilierten Linearführung hängen also auch von der Präzision der geführten Bewegung ab. In einem dafür entwickelten Prüfstand kann die Genauigkeit der Bewegung eines Schlittens auf einer spaltprofilierten Linearführung entlang des Hubwegs untersucht werden. Abbildung 47 zeigt die zentralen Komponenten des Prüfstands.

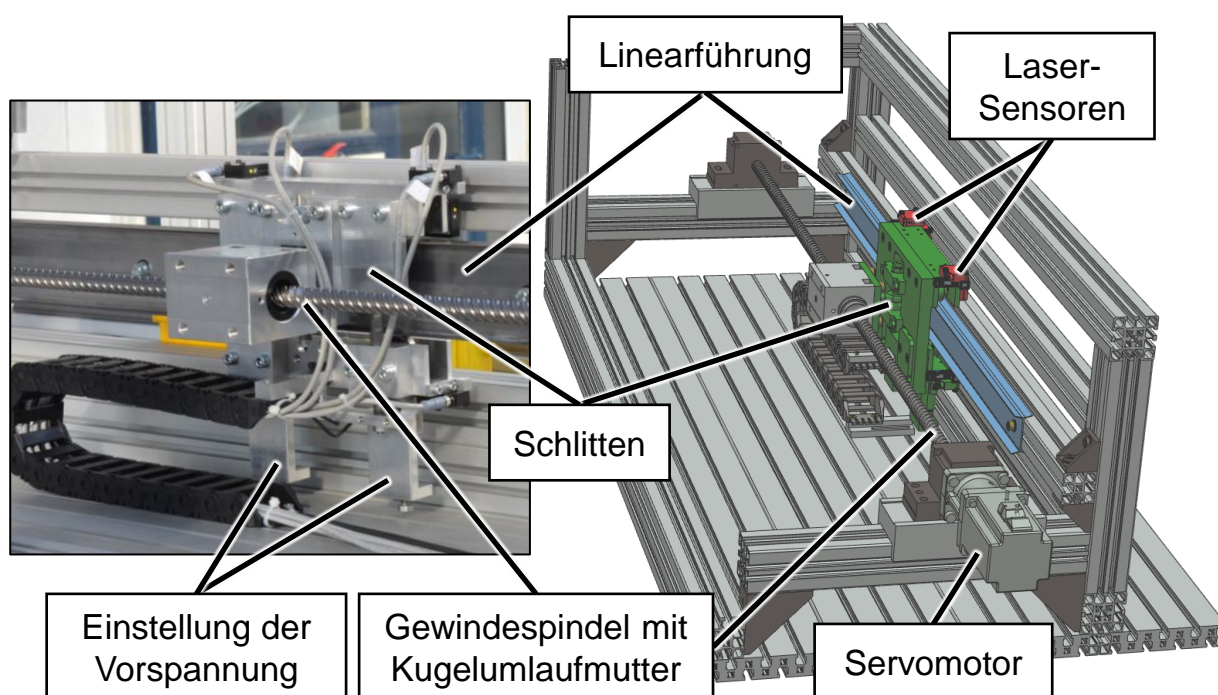


Abbildung 47: Prüfstand zur Untersuchung spaltprofiliertter Linearführungen

Kern des Prüfstands ist ein 1000 mm langes Spaltprofil (blau eingefärbt in Abbildung 47), das auf beiden Seiten seines Stegs Flansche mit einem Nenn-Öffnungswinkel von 160° aufweist und mithilfe von Schrauben an der Umgebungsstruktur befestigt ist. Die spaltprofilierten Flansche dienen als Führung und Wälzkontaktfläche eines mit Laufrollen ausgestatteten Schlittens (grün eingefärbt in Abbildung 47), der durch einen Gewindespindelantrieb auf der spaltprofilierten Führung bewegt wird. Die Vorspannung des Linearführungssystems wird mithilfe von Schrauben und einer Gleitbuchse eingestellt, mit deren Hilfe der Abstand der gegenüberliegenden Laufrollen beeinflusst werden kann. Laser-Messsensoren (rot eingefärbt in Abbildung 47) erfassen die Bewegung des Schlittens entlang seines Hubwegs in Y-Richtung, also die Auf- und Abbewegung des Schlittens. Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse zweier Messreihen, in denen die Vorspannung des

Linearführungssysteme auf $V1 = 50 \text{ N}$ bzw. $V2 = 300 \text{ N}$ eingestellt wurde. Die Messergebnisse zeigen, dass die Bewegung des Schlittens nicht gleichmäßig entlang des 500 mm langen Hubwegs verläuft, sondern unregelmäßige Abweichungen aufweist. Die Mittelwerte der gemessenen Y-Positionen des Schlittens schwanken entlang des Hubwegs mit einer Spannweite $R = 0,182 \text{ mm}$ und einer Standardabweichung $s = 0,052 \text{ mm}$ (für $V1$) bzw. $R = 0,121 \text{ mm}$ mit $s = 0,038 \text{ mm}$ (für $V2$).²³⁸ Die auftretenden Abweichungen der Schlittenbewegung liegen damit im Bereich von $180 \text{ }\mu\text{m}$ während Profilschienenführungen nach DIN ISO 12090-1 bei einer Linearführungslänge von 1000 mm maximale Abweichungen von $32 \text{ }\mu\text{m}$ aufweisen.²³⁹

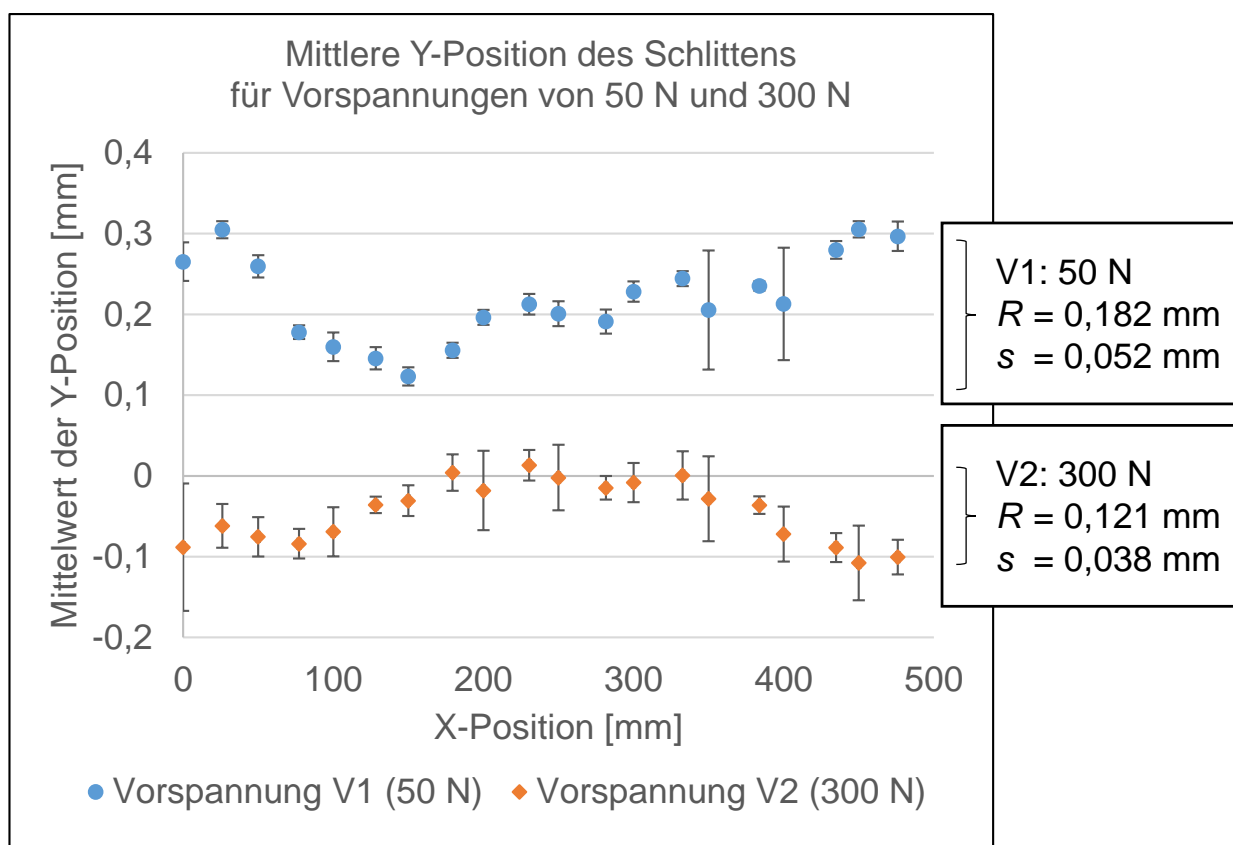


Abbildung 48: Schwankung der Y-Position des Schlittens entlang des Hubwegs mit zwei verschiedenen Vorspannwerten (die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des jeweiligen Mittelwerts)

²³⁸ In Anlehnung an VDI/DGQ 3441 (2014), S. 9 ff. wurden an 20 ungleichmäßig verteilten Messpunkten entlang des Hubwegs jeweils 10 Messwerte für die Y-Position des Schlittens erfasst. Für jeden Messpunkt wurden Mittelwerte gebildet und für diese Spannweite und Standardabweichung berechnet.

²³⁹ Vgl. DIN ISO 12090-1 (2016), S. 18f.

Die Ungenauigkeit der Bewegung ist auf prozessbedingte Geometrieabweichungen der spaltprofilierten Führungsschiene zurückzuführen. Damit stehen technologiebedingte Geometrieabweichungen der erzeugten Schiene der großen Vielfalt an möglichen Produktgestaltungen mit hohem Funktionsintegrationspotential, die die kontinuierliche Fließfertigung erlaubt, gegenüber. Für Anwendungen, die sehr hohe Anforderungen an die Präzision der Bewegung stellen, wie beispielsweise in Werkzeugmaschinen, ist eine spaltprofilierte Linearführung also nicht geeignet. Daher bieten sich Anwendungen der Schiene an, in denen eine hohe Funktionalität wichtiger ist, als die erzielbare Genauigkeit. Hierfür müssen die Möglichkeiten der Fertigungstechnologie hinsichtlich der Funktionsintegration genutzt werden, um eine Schiene mit hoher Funktionalität bei gleichzeitig geringem Herstelleraufwand zu realisieren.

Schritt 4: Festlegung der zu integrierenden Produktfunktionen

Existierende Linearführungen weisen die grundlegenden Funktionen „Linear führen“ eines Schlittens sowie „Wälzkontaktfläche bereitstellen“ bei Schlitten, die mit Wälzkörpern auf der Führungsschiene verfahren, auf²⁴⁰. Durch eine Erweiterung der Systemgrenze können zusätzliche Funktionen identifiziert werden, die für eine Funktionserweiterung in Betracht kommen.²⁴¹ Für Linearführungen sind noch weitere Funktionen denkbar, die in verschiedenen Anwendungsszenarien einen gesteigerten Kundennutzen erzielen können. Beispielsweise kann, je nach Entwicklungsziel, eine Linearführungseinheit um eine Antriebsfunktion erweitert werden²⁴², um eine Bremsfunktion²⁴³ oder die Leitung von Fluiden, wie im Beispiel des Linearsystems, das in einem Fassadenreiniger zum Einsatz kommt²⁴⁴. Betrachtet man die Linearführung im Kontext ihrer Nachbarsysteme, so ist auch die Möglichkeit zur Befestigung der Linearführung an die Umgebungskonstruktion zu bedenken. Zur Präzisierung des Entwicklungsziels finden sich in der Literatur verschiedene Methoden wie beispielsweise die Untersuchung des Einflusses verschiedener Funktionen auf den Kundennutzen mithilfe einer QFD oder auch des Kano-Modells.

²⁴⁰ Vgl. Rexroth Bosch Group (2006), S. 2.1-2.5.

²⁴¹ Siehe Abschnitt 4.2.2.

²⁴² Vgl. Wagner et al. (2015), S. 83 - 88.

²⁴³ Vgl. Lommatzsch et al. (2011a), S. 337 - 346.

²⁴⁴ Vgl. Roos et al. (2017c), S. 309.

Hinsichtlich der Genauigkeit und der erzielbaren Lebensdauer einer Linearführung spielt die Vorspannung eine wesentliche Rolle. Eine Linearführung und der auf ihr verfahrenende Schlitten samt Wälzkörpern stellen ein verspanntes System dar. Die Vorspannung erlaubt die geführte Bewegung des Schlittens auf der Linearführung und beeinflusst damit die Genauigkeit der Bewegung sowie die entstehende Reibung und damit die zu erwartende Lebensdauer der Komponenten. Bei den meisten Linearführungssystemen wird die Vorspannung durch das Einbringen unterschiedlich großer Wälzkörper beeinflusst oder durch ein Zustellen der Wälzkörper, wie im in Abbildung 47 dargestellten Aufbau. Wird die Vorspannung mithilfe der Wälzkörper eingestellt, so kann diese nicht flexibel entlang des Hubwegs reguliert werden. Geschieht die Einstellung am Schlitten, so erhöht das die notwendige Komplexität und damit den Aufwand der Schlittenkonstruktion. Die Entwicklung einer Linearführungsschiene, die nicht nur die Führung des Schlittens gestattet, sondern gezielt auch eine selektive Beeinflussung der Vorspannung, erlaubt eine mögliche Steigerung des Kundennutzens und verspricht daher ein hohes Produktinnovationspotential, wenn diese Steigerung des Kundennutzens mit einem geringen Herstelleraufwand einhergeht. Die Funktion „Vorspannung beeinflussen“ ist also eine vielversprechende Zusatz-Funktion des zu entwickelnden Produkts. Das Entwicklungsziel des vorliegenden Projekts sieht somit die Realisierung folgender Funktionen in der spaltprofilierten Schiene vor:

- Vorspannung beeinflussen
- Linear führen
- Wälzkontaktfläche bereitstellen
- Anbringung an Umgebungsstruktur

Schritt 5: Identifikation möglicher Funktionsträger

Im nächsten Schritt werden zur Vorbereitung der Entwicklung fertigungsintegrierender Lösungselemente geeignete Funktionsträger für die Realisierung der in Schritt 4 festgelegten Produktfunktionen erarbeitet.²⁴⁵ Ein Linearführungssystem besteht aus einer Linearführung, einem auf dieser verfahrenenden Schlitten und Wälzkörpern, die den reibungsarmen Kontakt zwischen Schiene und Schlitten herstellen. Ein solches Linearführungssystem kann, ähnlich einer Schraubenverbindung, als verspanntes System angesehen werden. Aus diesem Grund ergeben

²⁴⁵ Siehe Abschnitt 4.2.3.

sich zwei Grundansätze zur selektiven Beeinflussung der Vorspannung: Zum einen durch die Beeinflussung des Vorspannwegs, zum anderen durch die Beeinflussung der Steifigkeit des Systems.²⁴⁶ Die Steifigkeit des Systems ist über den Zusammenhang $c = \frac{E \cdot A}{b_0}$ mit $A = d \cdot l$ gegeben. Die diesen Zusammenhang beschreibenden geometrischen Eigenschaften geben einen Hinweis auf die Eigenschaften denkbarer Funktionsträger zur Beeinflussung der Systemsteifigkeit. Geeignete Funktionsträger zeichnen sich dadurch aus, dass durch ihre Gestaltung Einfluss auf diese funktionsrelevanten Eigenschaften genommen werden kann. Abbildung 49 zeigt denkbare Funktionsträgervarianten, die sich in diesen Eigenschaften im Wert unterscheiden.

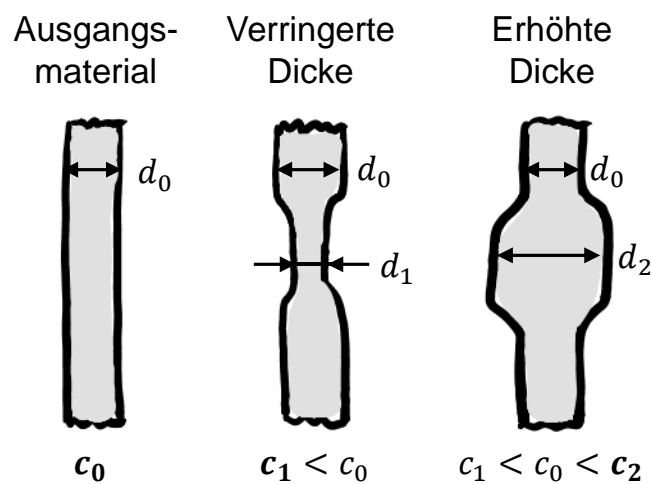


Abbildung 49: Funktionsträgervarianten zur Beeinflussung der Steifigkeit²⁴⁷

Im Gegensatz zur Beeinflussung der Systemsteifigkeit lässt sich eine Beeinflussung des Vorspannwegs nicht über einfache Gleichungen beschreiben. Daher wird das Lösungsfeld dieses Lösungsansatzes mithilfe einer systematischen Variation von Eigenschaften bzw. deren zugrundeliegenden Werte erarbeitet.²⁴⁸ Durch die Variation von physikalischem Effekt (mechanisch, hydraulisch), Wirkbewegung (translatorisch, rotatorisch) und der Anzahl an Wirkelementen (1, >1 zur Ausnutzung etwaiger Symmetrieeffekte) ergeben sich acht verschiedene Funktionsträgervarianten zur Beeinflussung des Vorspannwegs. Abbildung 50 stellt die Varianten dar.

²⁴⁶ Vgl. Roos et al. (2017b), S. 272.

²⁴⁷ In Anlehnung an Roos et al. (2017b), S. 273.

²⁴⁸ Siehe Abschnitt 4.2.3.

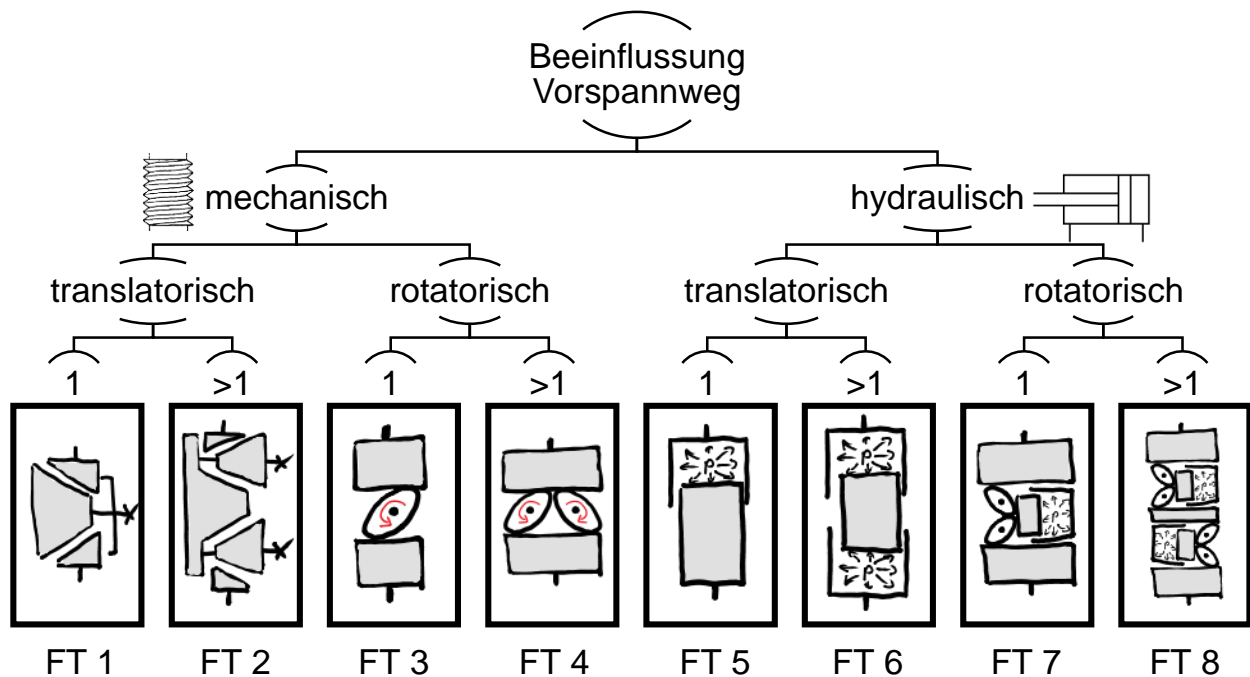


Abbildung 50: Funktionsträgervarianten zur Beeinflussung des Vorspannwegs²⁴⁹

Die entwickelten Funktionsträgervarianten lassen sich mithilfe von funktionsrelevanten Eigenschaften beschreiben, die sich aus den bei der systematischen Variation betrachteten Merkmalen ableiten lassen. So stellt für die in Abbildung 50 dargestellte Funktionsträgervariante „mechanisch, rotatorisch, ein Wirkelement“ (FT 3 in Abbildung 50) die Winkelstellung des Wirkelements eine funktionsrelevante Eigenschaft dar, mit deren Hilfe der Vorspannweg beeinflusst werden kann. Die entwickelten Funktionsträgervarianten stellen zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung noch allgemeingültige Varianten auf Wirkprinzipiebene dar, die nicht auf die besonderen Gestaltungsmöglichkeiten abgestimmt sind, die aus dem Einsatz einer bestimmten Fertigungstechnologie entspringen. Zur Vorbereitung dieser Fertigungsintegration werden die zu den verschiedenen Funktionen passenden Funktionsträgervarianten in die Zeilenüberschriften der DPM eingetragen, wie in Abbildung 51 dargestellt.

²⁴⁹ In Anlehnung an Roos et al. (2017b), S. 273.

		Spaltprofilieren		SpaBi	WaPro	HSC	Laser-Schw.	Fertigungs-integ. FT
Beeinflussung Vorspannweg (hydraulisch) (mechanisch)	rotatorisch							
	translatorisch							
	rotatorisch							
	translatorisch							
	rotatorisch							
	translatorisch							
	rotatorisch							
	translatorisch							
	rotatorisch							
	translatorisch							
	rotatorisch							
	translatorisch							
	rotatorisch							
	translatorisch							
	rotatorisch							
	translatorisch							
Vorspannung beeinflussen								
Kombinationen								

Abbildung 51: Übertragung der Funktionsträgervarianten in die DPM²⁵⁰

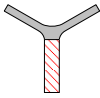






Die in Abbildung 51 noch unausgefüllten Zellen in den Schnittpunkten zwischen den eingetragenen Funktionsträgervarianten sowie den in Schritt 2 dokumentierten verfahrensinduzierten Gestaltelementen werden im folgenden Schritt mit passenden Lösungselementen gefüllt und zu fertigungsintegrierenden Funktionsträgern in einer zusätzlichen Spalte kombiniert.²⁵¹ Die in Abbildung 51 unten für die Kombination angefügten Zeilen werden in Schritt 7 nach Anwendung der Integrationsstrategien gefüllt.

²⁵⁰ In Anlehnung an Roos et al. (2017b), S. 275.

²⁵¹ Siehe Abschnitt 4.2.3.

Schritt 6: Fertigungsintegration zur Realisierung fertigungsintegrierender Lösungselemente

Im nächsten Schritt des Vorgehens werden die zunächst allgemeingültigen Funktionsträgervarianten schrittweise den verfahrensinduzierten Gestaltelementen in der DPM gegenübergestellt.²⁵² Diese Gegenüberstellung unterstützt bei der Erarbeitung fertigungsintegrierender Lösungselemente, die sich durch eine hohe Ausnutzung der fertigungstechnologiespezifischen Gestaltungsmöglichkeiten zur Funktionserfüllung auszeichnen. In die Schnittpunkt-Zellen der DPM werden Lösungselemente eingetragen, die unter Zuhilfenahme der verfahrensinduzierten Gestaltelemente der jeweiligen Spalte die erforderlichen funktionsrelevanten Eigenschaften der Funktionsträgervariante oder zumindest Bestandteile dieser Variante realisieren können.²⁵³ Dabei können manche der betrachteten verfahrensinduzierten Gestaltelemente nur einen Teil der erforderlichen funktionsrelevanten Eigenschaften realisieren und damit erst durch die Kombination mit anderen verfahrensinduzierten Gestaltelementen die für die Realisierung des Funktionsträgers erforderlichen Eigenschaften vollständig bereitstellen. In Abbildung 52 ist ein Ausschnitt der DPM dargestellt, der die ausgefüllten Schnittpunkt-Zellen für eine Funktionsträgervariante zur Beeinflussung der System-Steifigkeit zeigt.

			SpaPro	WaPro	HSC-Bearbeitung	
						
Steifigkeit beeinflussen		<ul style="list-style-type: none"> • Blechdicke d0 • Blechdicke d1 				

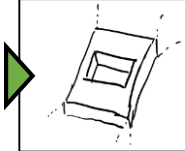


Abbildung 52: Entwicklung fertigungsintegrierender Lösungselemente zur Beeinflussung der Systemsteifigkeit mithilfe der DPM

Die beiden wesentlichen funktionsrelevanten Eigenschaften der dargestellten Funktionsträgervariante zur Beeinflussung der System-Steifigkeit stellen die Aus-

²⁵² Siehe Abschnitt 4.2.3 und 4.3.1.



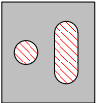






²⁵³ Siehe Abschnitt 4.3.1.

gangsblechdicke dar sowie eine Blechdicke, die größer oder kleiner ist als die Ausgangsblechdicke, um an definierten Stellen die Systemsteifigkeit zu beeinflussen. Beim schrittweisen Abgleichen dieser Funktionsträgervariante mit den ihr zugrundeliegenden funktionsrelevanten Eigenschaften fällt im Bezug auf das verfahrensinduzierte Gestaltelement „Spaltprofilierte Steg“ auf, dass dieses in der Lage ist, die erforderliche Ausgangsblechdicke bereitzustellen. Der Steg alleine erlaubt jedoch nicht die vollständige Realisierung des betrachteten Funktionsträgers. Aus diesem Grund müssen weitere verfahrensinduzierte Gestaltelemente untersucht werden, um die erforderlichen verfahrensinduzierten Eigenschaften zu erhalten. Mithilfe von HSC-Bearbeitung lassen sich beispielsweise Taschen und Nuten in ein Blech einbringen. Diese verfahrensinduzierten Gestaltelemente sind charakterisiert durch eine Änderung der Blechdicke im Vergleich zu einer Ausgangs-Blechdicke. In Kombination mit einem spaltprofilierten Steg stellt das verfahrensinduzierte Gestaltelement „HSC-Nut“ also eine Möglichkeit zur Realisierung des Funktionsträgers dar. Diese Kombination aus den erforderlichen verfahrensinduzierten Gestaltelementen, die damit ein verfahrensinduziertes Gestaltelement einer Verfahrenskette darstellt²⁵⁴, wird nun in einer zusätzlichen Spalte auf der rechten Seite der DPM als fertigungsintegrierender Funktionsträger dieser Funktion eingetragen. Durch die gezielte Nutzung der Möglichkeiten der Fertigungstechnologien zur Produktgestaltung, die durch die bereitgestellten verfahrensinduzierten Gestaltelemente repräsentiert sind, stellt diese Kombination ein fertigungsintegrierendes Lösungselement dar, das in Kombination mit anderen Lösungselementen zur vollständigen Produktgestalt kombiniert werden kann.²⁵⁵

Analog wird für die anderen Funktionsträgervarianten verfahren. Abbildung 53 zeigt eine Kombination aus verfahrensinduzierten Gestaltelementen für die Funktionsträgervariante zur Beeinflussung des Vorspannwegs, die ebenfalls aus verschiedenen verfahrensinduzierten Gestaltelementen der kontinuierlichen Fließfertigung zusammengesetzt ist.

²⁵⁴ Vgl. Gramlich (2013), S. 102f.

²⁵⁵ Siehe Abschnitt 4.2.4.

			SpaPro	WaPro	HSC-Bearbeitung	
						
VS-Weg beeinflussen		<ul style="list-style-type: none"> • Winkel • Blechdicke • Krafteinleitung 				






Abbildung 53: Kombination in der DPM zur Beeinflussung des Vorspannwegs

Können weitere Kombinationsmöglichkeiten aus verfahrensinduzierten Gestaltelementen identifiziert werden, so wird die DPM um zusätzliche Zeilen ergänzt, die der gleichen Funktionsträgersvariante zugeordnet werden. Eine Nummerierung der einzelnen Zeilen hilft hierbei, verschiedene Varianten zur Realisierung eines Funktionsträgers zuordnen zu können.

Die in diesem Schritt erarbeiteten fertigungsintegrierenden Funktionsträger sind mögliche Funktionsträger einzelner Teilfunktionen. Damit stellen sie mögliche Lösungselemente einer Gesamtlösung dar, die alle Produktfunktionen bereitstellt und die durch die Kombination kompatibler Lösungselemente entsteht.

Schritt 7: Anwendung der Strategien zur Funktionsintegration, Entwicklung von Gesamtkombinationen

Im nächsten Schritt werden geeignete Lösungselemente ausgewählt, die gemeinsam alle geforderten Funktionen – „Linear führen“, „Vorspannung beeinflussen“, „Wälzkontaktfläche bereitstellen“ und „Anbringung an Umgebungsstruktur“ – des Produkts erfüllen können.²⁵⁶ Zur Erarbeitung von Lösungen kann die Analyse von Referenzlösungen helfen, von denen ausgehend Kombinationsmöglichkeiten gesucht werden, anhand derer der Integrationsgrad schrittweise gesteigert werden kann. Als Referenzlösungen werden in diesem Fall eine spaltprofilierte Linearführungsschiene, mit deren Hilfe die Vorspannung des Systems nicht beeinflusst werden kann, sowie ein System bestehend aus spaltprofilierte Schiene und Schlitten, an dem durch Zustellung der Wälzkörper die Vorspannung beeinflusst wird, wie in Abbildung 54 dargestellt, in die DPM eingetragen. In beiden Referenzsystemen

²⁵⁶ Siehe Abschnitt 4.2.4.

werden die Führung durch den Öffnungswinkel der spaltprofilierten Flansche realisiert, sowie deren Oberfläche als Wälzkontaktfläche verwendet. Bohrungen, die mithilfe einer HSC-Bearbeitung in das Schienenprofil eingebracht werden, erlauben die Befestigung der Linearführung an der Umgebungsstruktur. Das in Abbildung 54 dargestellte Referenzsystem ist um einen Schlitten erweitert, an dem die Vorspannung beeinflusst werden kann, und der mithilfe diskontinuierlicher Fertigungstechnologien gefertigt ist.





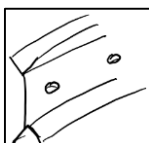




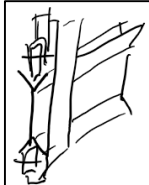
	SpaPro		HSC	Sonst.	
Ref.1: SpaPro Schiene					
Ref.2: SpaPro Schiene Schlitten					

Abbildung 54: Abbildung des Referenzsystems in der DPM

In einer zusätzlichen Zeile werden nun die Gesamtfunktion des Produkts eingetragen und gezielt nach Kombinationsmöglichkeiten der fertigungsintegrierenden Funktionsträger der einzelnen Funktionen gesucht. Durch Anwendung der Integrationsstrategien²⁵⁷ können Gesamtlösungen erarbeitet werden, die sich durch einen hohen Integrationsgrad auszeichnen. Unter Beachtung der Technologieintegration werden Lösungskombinationen gesucht, die mithilfe einer geringeren Anzahl notwendiger Fertigungstechnologien fertigbar sind. Die Referenzlösung verwendet eine Schlittenkonstruktion mit einer Vielzahl an Zukaufteilen, um die Vorspannung einstellen zu können. Lösungskombinationen, die die Verwendung von Lösungselementen vorsehen, die zur Realisierung der Funktion „Vorspannung Beeinflussen“ auf Technologien der kontinuierlichen Fließfertigung zurückgreifen können, wie in Abbildung 52 und Abbildung 53 dargestellt, werden damit bereits der Strategie zur Technologieintegration gerecht. Ausgehend von den in der Referenzlösung bereits realisierten verfahrensinduzierten Gestaltelementen der kon-

²⁵⁷ Siehe Abschnitt 4.1.1 bis 4.1.3.

tinuierlichen Fließfertigung werden nun Lösungselemente gesucht, die einzig Fertigungstechnologien der kontinuierlichen Fließfertigung zur Realisierung der Funktionsträger benötigen. Abbildung 55 zeigt einen Ausschnitt aus der erarbeiteten DPM, in der das in Abbildung 53 gezeigte Lösungselement zur Realisierung des Funktionsträgers für die Beeinflussung der Vorspannung mit Lösungselementen kombiniert wird, die keine zusätzlichen Fertigungstechnologien zur Realisierung aller gewünschten Produktfunktionen nötig machen. Diese Gesamtlösung wird neben dem Referenzprodukt in den Zeilen unter der Überschrift „Gesamtfunktion“ dokumentiert. Durch die ausschließliche Verwendung der Fertigungstechnologien der kontinuierlichen Fließfertigung ergeben sich zwangsläufig Produktlösungen in Integralbauweise.

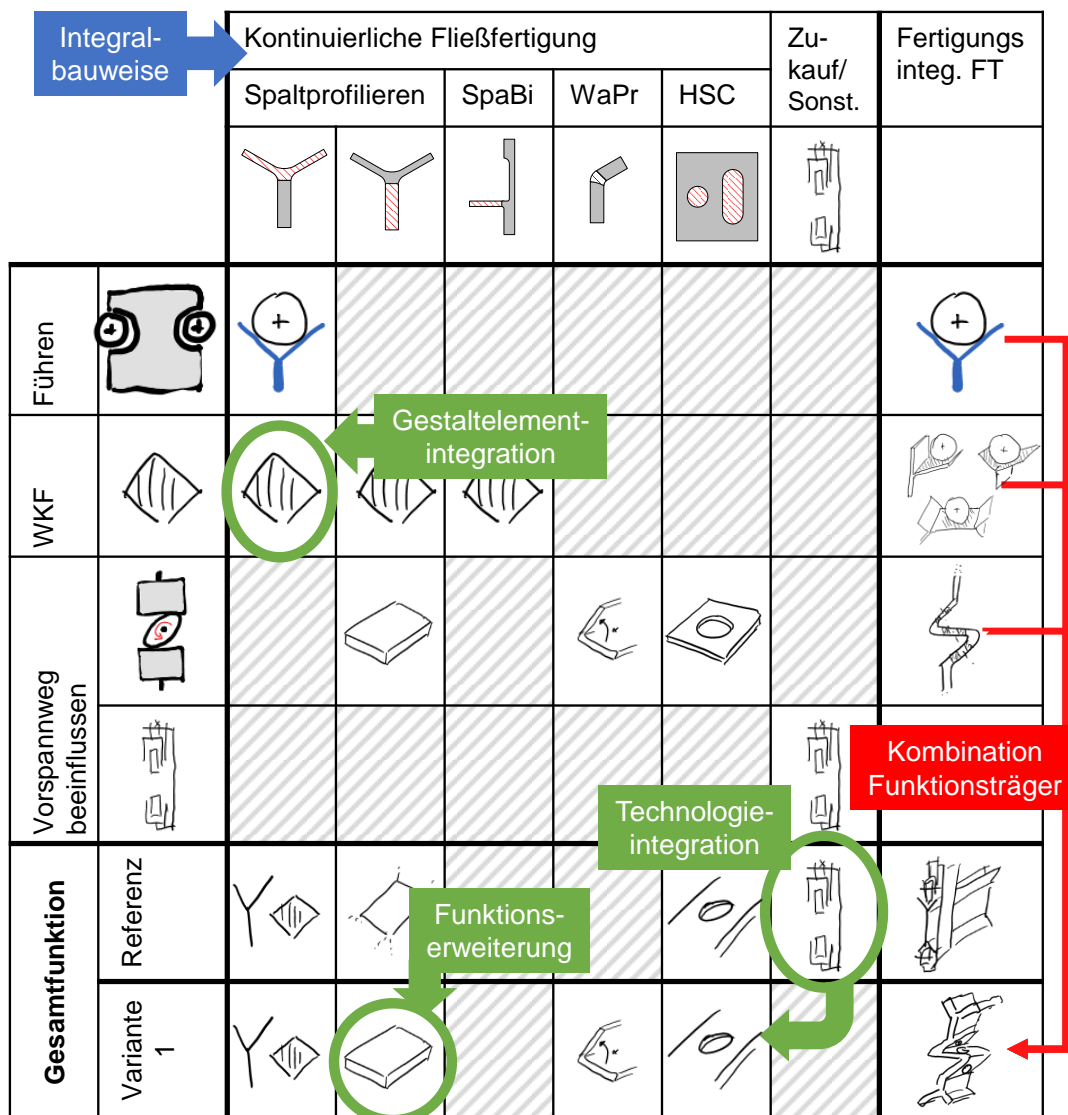


Abbildung 55: Erfüllung der Gesamtfunktion in der DPM

In Abbildung 56 sind exemplarisch zwei Gesamtlösungen dargestellt, die durch Kombination verschiedener fertigungsintegrierender Funktionsträger unter gezielter Berücksichtigung der Integrationsstrategien entstanden sind. Für die Realisierung der Wälzkontaktfläche kommen neben der Umsetzung mithilfe des spaltprofilierten Flansches auch die Nutzung des spaltprofilierten Stegs in Frage oder die Nutzung spaltgebogener Flansche. Den Einträgen der DPM kann entnommen werden, dass sich spaltprofilierte Flansche auch für die Umsetzung der Führungsfunktion eignen. Gemäß der Strategie zur Gestaltelementintegration ist in den in Abbildung 56 dargestellten Lösungen das verfahrensinduzierte Gestaltelement „spaltprofilierte Flansch“ zur Realisierung der Führungsfunktion und gleichzeitig zur Bereitstellung der Wälzkontaktfläche vorgesehen. Lösungen, in denen beispielsweise spaltgebogene Flansche als Wälzkontaktfläche verwendet werden, würden zur Realisierung der Gesamtfunktion eine weitere Gestaltelementart benötigen und damit einen geringeren Integrationsgrad aufweisen – ein Indikator für einen höheren Fertigungsaufwand. Zur Realisierung der Funktion zur Beeinflussung der Vorspannung werden in der in Abbildung 56 links dargestellten Lösung mithilfe von HSC-Bearbeitung gezielt Schienenabschnitte mit erhöhter bzw. verringerter Systemsteifigkeit erzeugt. In der in Abbildung 56 rechts dargestellten Lösung sind ein walzprofilierte Steg und HSC-Bohrungen zur Realisierung einer Geometrie kombiniert, die eine Anpassung des Vorspannwegs erlaubt. Weiterhin ermöglichen durch HSC-Bearbeitung eingebrachte Bohrungen die Anbringung der Führungen an die Umgebungsstruktur (in Abbildung 56 nicht dargestellt).

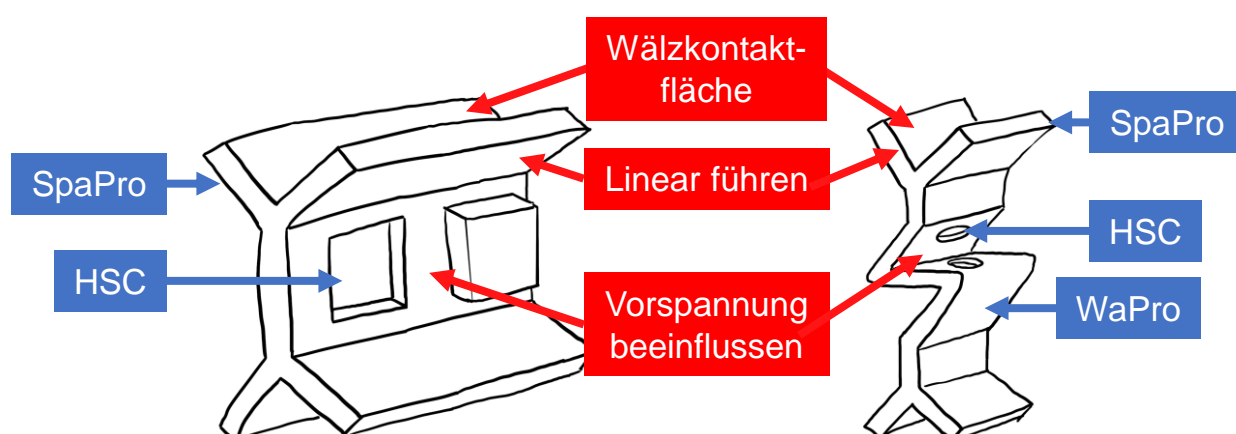


Abbildung 56: Zwei exemplarische Gesamtlösungen

Im Vergleich zu der in Abbildung 54 oben dargestellten Referenzlösung ist in diesen Gesamtlösungsvarianten eine Funktionserweiterung zu erkennen. Mithilfe der verfahrensinduzierten Gestaltelemente der kontinuierlichen Fließfertigung ist nun

mit der Beeinflussung der Vorspannung eine zusätzliche Funktion realisierbar, ohne dass zusätzliche Fertigungstechnologien zur Realisierung eines Schlittens mit dieser Funktionalität eingesetzt werden müssen. Im Vergleich zu der in Abbildung 54 unten dargestellten Referenzlösung ist die Funktionalität des Gesamtsystems gleich geblieben. Durch die Technologieintegration besteht jedoch das Potential, den notwendigen Herstelleraufwand verringern zu können.

Weiteres Vorgehen: Übergabe an den Beurteilungsprozess

Die in Schritt 7 erarbeiteten Gesamtlösungen erweitern das Lösungsfeld um Lösungen, die sich durch einen hohen Integrationsgrad auszeichnen und somit die Möglichkeiten der verwendeten Fertigungstechnologien und gefundenen Konzepte zur Integration umfassend ausschöpfen. Sie sind als Ergänzung zu Varianten zu sehen, die im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses mit etablierten Lösungsfindungsmethoden erarbeitet worden sind. Durch ihren hohen Integrationsgrad weisen die mithilfe der DPM entwickelten Varianten ein großes Potential zur Verringerung des Herstelleraufwands bei gleichzeitiger Bereitstellung eines hohen Kundennutzens dar und damit auch ein großes Potential für Produktinnovationen. Der Integrationsgrad stellt allerdings nur einen Indikator für dieses Innovationspotential dar. Wie alle anderen Lösungen müssen auch sie im weiterführenden Entwicklungsprozess weiter konkretisiert und einer Beurteilung unterzogen werden.

Anhand der beiden in Abbildung 56 dargestellten Varianten wird beispielhaft gezeigt, wie die mithilfe der DPM entwickelten Lösungen in weiterführenden Entwicklungsschritten unter Verwendung etablierter Methoden, wie beispielsweise FE-Simulationen und der Untersuchung von Prototypen, weiter konkretisiert werden können. Die Variante zur Beeinflussung der Vorspannung durch Variation der Systemsteifigkeit wurde prototypisch umgesetzt wie in Abbildung 57 (a) dargestellt. Auf Basis von CAD-Modellen der entwickelten Lösungen, wie in Abbildung 57 (b) dargestellt, werden FE-Simulationen durchgeführt, um den Erfüllungsgrad der Hauptfunktion „Vorspannung Beeinflussen“ zu untersuchen. Abbildung 57 (c, d) zeigt die Ergebnisse der FE-Simulation für die in Abbildung 56 links dargestellte Variante zur Beeinflussung der Systemsteifigkeit.

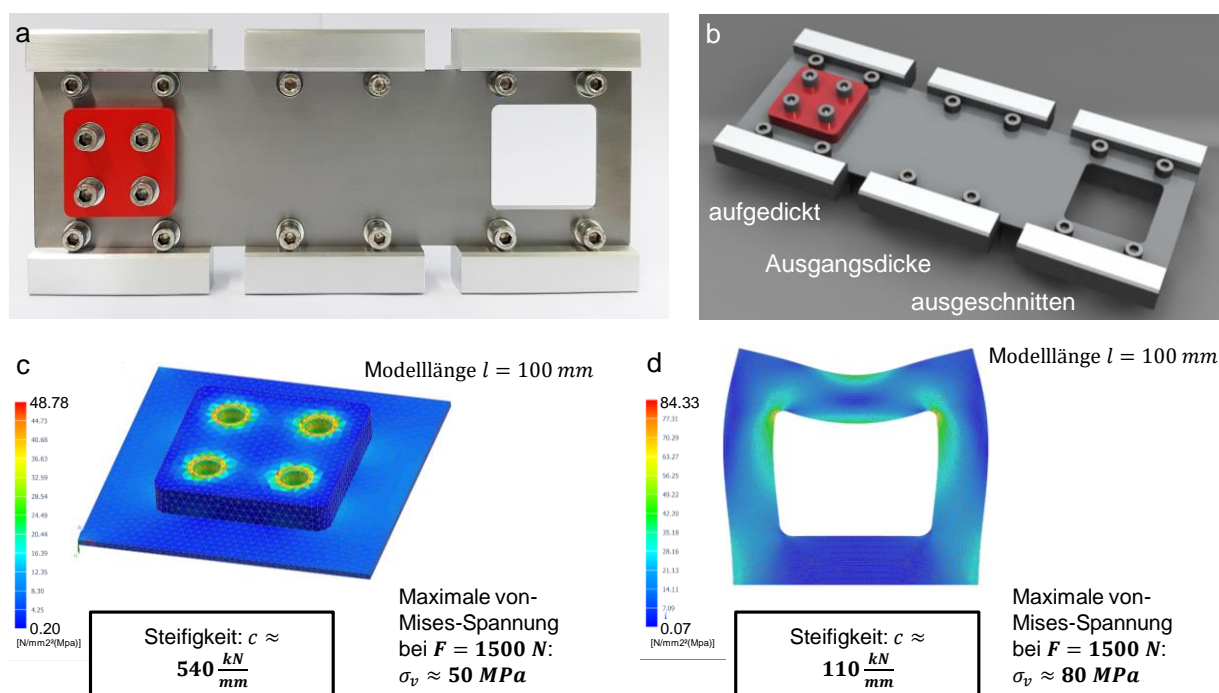


Abbildung 57: Simulationsergebnisse für die Lösungsvariante zur Beeinflussung der Systemsteifigkeit²⁵⁸

In der durchgeführten Simulation wurde zur Verringerung des Simulationsaufwands nur der Stegbereich des Profils betrachtet. Dabei ergeben sich für Blechsegmente mit ausgeschnittenem Bereich Steifigkeiten von $c = 110 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$, während sich zum Vergleich in einem aufgedickten Bereich des Stegs Werte von $c = 540 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ für die Steifigkeit ergeben, was einer Steigerung von bis zu 400% entspricht.²⁵⁹ Mithilfe von HSC-Fertigungsprozessen lässt sich diese Variante mit geringem Aufwand herstellen. Abbildung 58 (c) zeigt die Simulationsergebnisse für die in Abbildung 56 rechts dargestellte Variante zur Beeinflussung des Vorspannwegs.

²⁵⁸ Vgl. Roos et al. (2017b), S. 276.

²⁵⁹ Vgl. Roos et al. (2017b), S. 274 - 276.

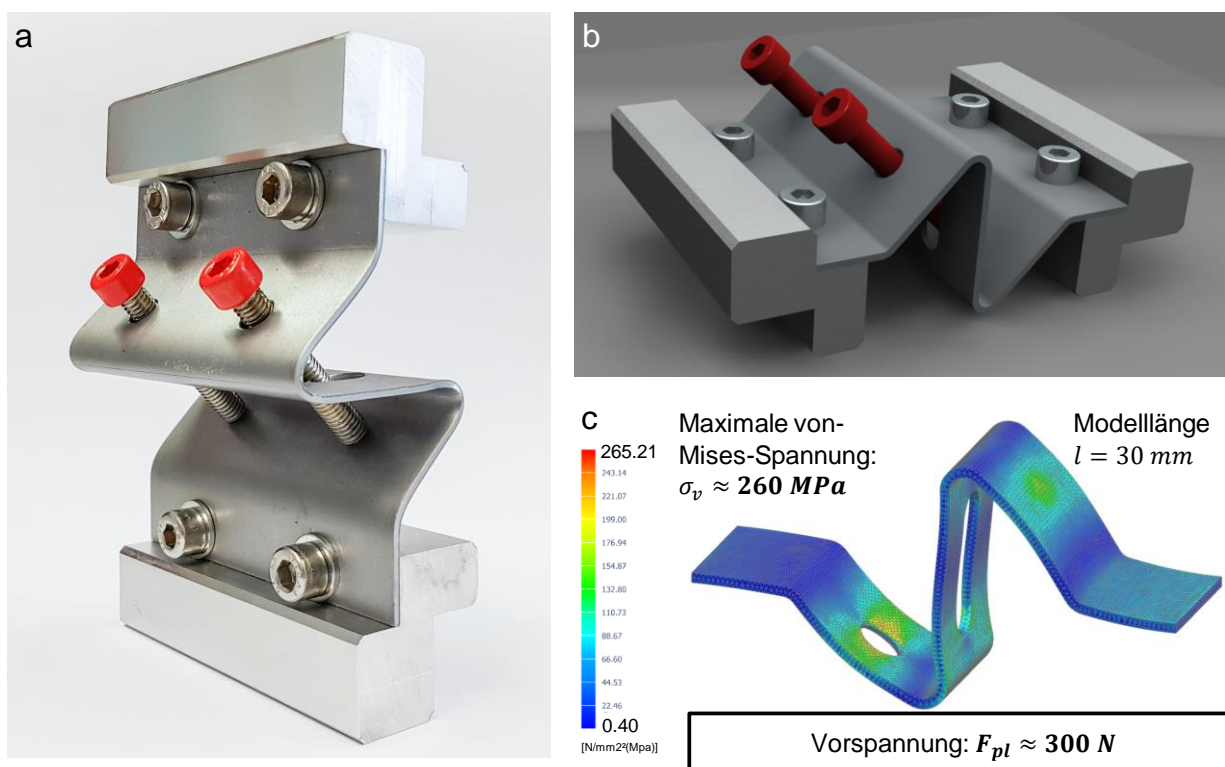


Abbildung 58: Simulationsergebnisse für die Lösungsvariante zur Beeinflussung des Vorspannwegs²⁶⁰

In dieser Variante wird, wie in der prototypischen Umsetzung, die in Abbildung 58 (a) dargestellt ist, mithilfe einer Schraube (rot markiert) eine Kraft auf den walzprofilierten Stegbereich aufgebracht. Hierdurch ändern sich die Winkel im gebogenen Stegbereich derart, dass das Blechprofil eine Längung in Höhenrichtung erfährt, ohne dass ein relevanter horizontaler Versatz entsteht, wie in Abbildung 59 dargestellt. Mit der Variante lassen sich Vorspannkräfte von bis zu 300 N bei einer betrachteten Profillänge von 30 mm erreichen, die in diesem Fall von der Festigkeit des verwendeten Werkstoffs ZStE340 begrenzt ist.²⁶¹

²⁶⁰ In Anlehnung an Roos et al. (2017b), S. 277.

²⁶¹ Vgl. Roos et al. (2017b), S. 276.

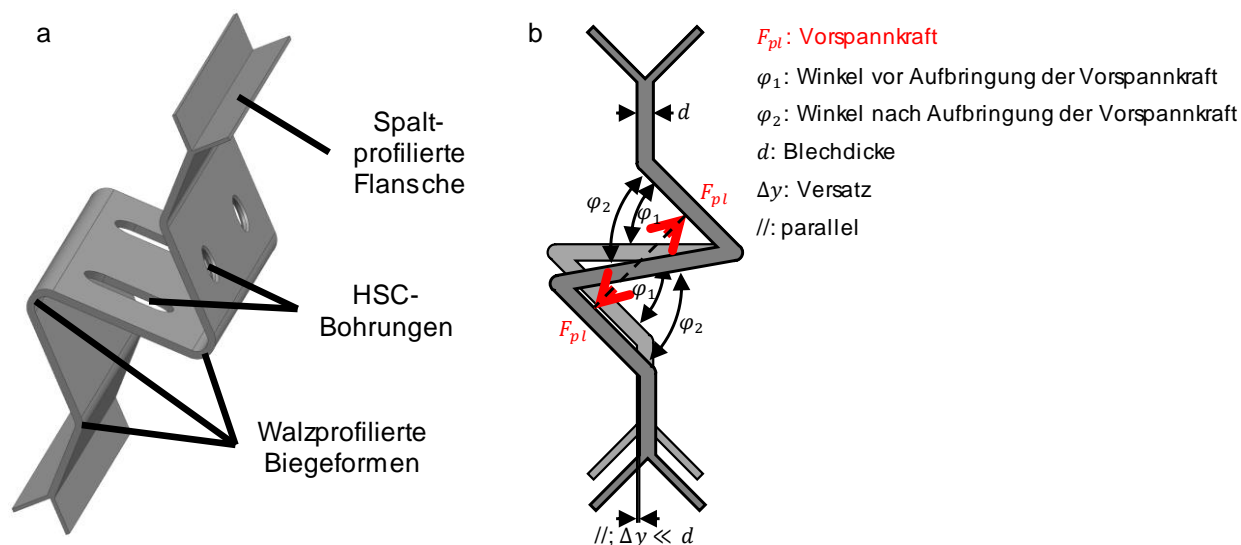


Abbildung 59: Variante zur Änderung des Vorspannwegs²⁶²

Durch die Abarbeitung der in Tabelle 5 aufgeführten Vorgehensschritte konnten unter Zuhilfenahme der modellbasierten Integrationsstrategien sowie durch Anwendung der DPM systematisch verschiedene Lösungen mit einem hohen Integrationsgrad entwickelt werden. Wie die nachfolgende Konkretisierung der beiden Varianten zeigen konnte, weisen diese nicht nur einen hohen Integrationsgrad, sondern durch die ihnen zugrundeliegenden fertigungsintegrierenden Lösungselemente auch Vorteile hinsichtlich der Funktionserfüllung auf und stellen somit vielversprechende Lösungen mit einem hohen Innovationspotential dar.

5.2 Analyse des Integrationsgrads einer Bajonettschraube

Schrauben sind das am häufigsten verwendete Verbindungselement im Maschinenbau.²⁶³ Bei einer Standardschraube für eine Einschraubverbindung²⁶⁴ werden üblicherweise mithilfe des Kaltumformverfahrens *Stauchen*²⁶⁵ schrittweise die Geometrie von Schaft und Kopf geformt und durch anschließendes *Gewindewalzen* das benötigte Gewinde erzeugt, wie in Abbildung 60 dargestellt. Im Gegensatz zum *Gewindeschneiden* hat das Gewindewalzen den Vorteil, dass es zusätzlich zu den Änderungen der geometrischen Eigenschaften zu einer Kaltverfestigung kommt und eine Erhöhung der Dauerfestigkeit im Gewinde von bis zu 50 % erreicht werden kann. Weitere Vorteile sind die Materialeinsparung von etwa 20 %

²⁶² In Anlehnung an Roos et al. (2017b), S. 276.

²⁶³ Vgl. Kirchner, Birkhofer (2017), S. 301.

²⁶⁴ Vgl. DIN EN ISO 4014 (2011), S. 6.

²⁶⁵ Vgl. DIN 8583-3 (2003), S. 6.

durch die spanlose Fertigung sowie sehr kurze notwendige Walzzeiten zur Herstellung des Gewindes.²⁶⁶ Derartige Schrauben stellen fertigungsintegrierende Lösungen dar, in denen die bereitgestellten verfahrensinduzierten Eigenschaften gezielt für die Funktionserfüllung genutzt werden und gleichzeitig eine kostengünstige Herstellung ermöglicht wird.

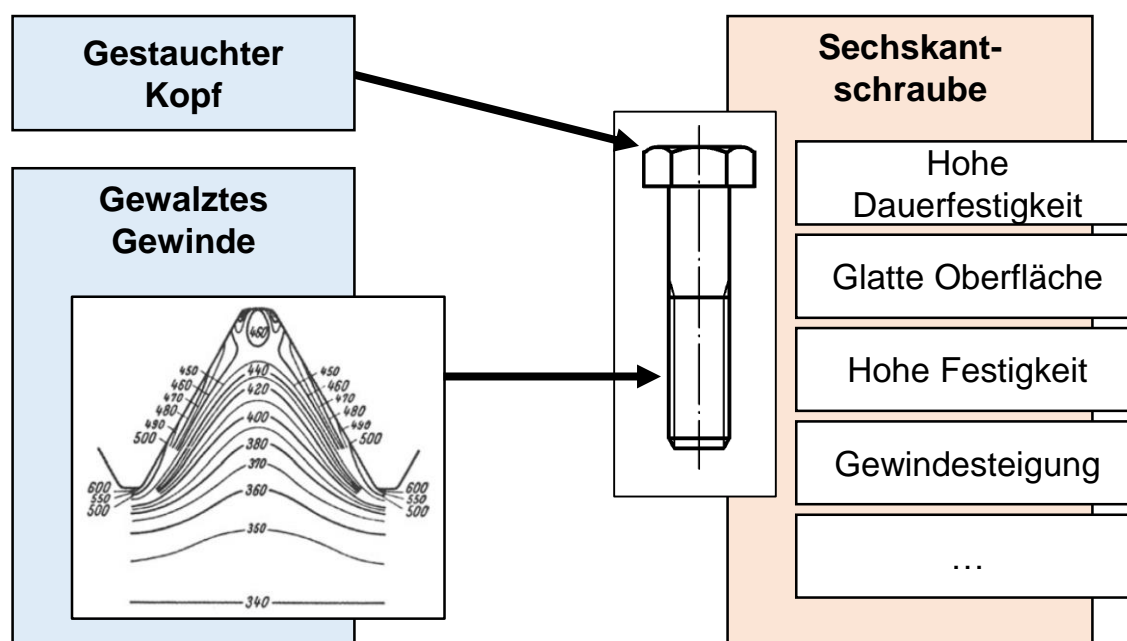


Abbildung 60: Nutzung der verfahrensinduzierten Eigenschaften des Gewindewalzens zur Realisierung der Schraubenfunktion²⁶⁷

Durch ihre Kopfauflage und das Gewinde ist eine Schraube in der Lage, Axialkräfte zu leiten. Durch eine Erweiterung der betrachteten Systemgrenze von der Schraube zur gesamten Verbindungszone können je nach Anwendungsfall zusätzliche Sicherungs- und Zentrierelemente notwendig werden. Im Einsatzprozess kann es dazu kommen, dass beispielsweise auftretende Schwingungen zu einem ungewollten Lösen der Schraubenverbindung führen. Aus diesem Grund sollten eine ausreichend hohe Vorspannkraft gewählt werden oder Schraubensicherungen, wie beispielsweise Zahnscheiben (DIN 6797), eingesetzt werden, die durch Mikroformschluss ein Losdrehen der Schraube verhindern.²⁶⁸ Gleichzeitig zentrieren Schrauben wie in Abbildung 60 dargestellt nicht, weswegen in eine Verbindung bei Bedarf zusätzliche Zentrierelemente, wie beispielsweise Passstifte, zur Verbindung ergänzt werden müssen. Ein um die beschriebenen Sicherungs- und

²⁶⁶ Vgl. Tschätsch (2005), S. 59f.

²⁶⁷ In Auszügen aus Tschätsch (2005), S. 59; DIN ISO 1891 (2009), S. 17.

²⁶⁸ Vgl. Kirchner, Birkhofer (2017), S. 335f.

Zentrierelemente erweitertes technisches System umfasst somit mindestens drei Einzelteile, für die jeweils unterschiedliche Fertigungsverfahren verwendet werden, um mittels der Einzelteile letztlich die drei Funktionen Zentrieren, Axialkräfte leiten und Sicherung/Formschluss sicherzustellen. Ausgehend von einer Standard-Sechskantschraube mit Schaft als Referenzlösung soll auf Basis der Integrationsstrategien²⁶⁹ anhand der von der *baier & michels GmbH & Co. KG* entwickelten Bajonettschraube aufgezeigt werden, welche fertigungsgetriebenen Schritte zur Entwicklung von Schraubenlösungen mit hohem Integrationsgrad führen können. In Abhängigkeit von der Gestaltung der verfahrensprinziprelevanten Elemente des Arbeitsmittels²⁷⁰ beim Stauchen können unterschiedliche Geometrien auf Basis desselben zugrundeliegenden Verfahrensprinzips erzeugt werden. Werden in einer DPM die angesprochenen Funktionsträger den durch die genannten Fertigungsverfahren erzeugten verfahrensinduzierten Gestaltelementen gegenübergestellt – wie in Abbildung 61 dargestellt – öffnet sich ein Lösungsraum für vollkommen unterschiedliche Lösungselemente.²⁷¹

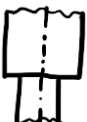
















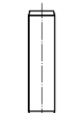
	Stauchen			Gewindewalzen		Schleifen	Sonstige Elemente	
								
Axialkräfte leiten								
Schrauben-sicherung / Formschluss								
Zentrierung								

Abbildung 61: DPM mit den in der Bajonettschraube umgesetzten Lösungselementen (grün markiert)²⁷²

²⁶⁹ Siehe Abschnitt 4.1.1 bis 4.1.3.

²⁷⁰ Siehe Abschnitt 2.3.3.

²⁷¹ Siehe Vorgehensschritte in Abschnitt 5.1.

²⁷² In Auszügen aus DIN ISO 1891 (2009), S. 100, 104.

Mithilfe des Stauchens lassen sich schrittweise neben dem Schraubenkopf auch Absätze fertigen. Wird ein solcher Absatz geschliffen, ermöglicht er wie ein geschliffener Passstift eine Zentrierung der Verbindung. Das Bajonettgewinde dient zur Schraubensicherung sowie zu einer vereinfachten Montage, da mit nur wenigen Umdrehungen die Verbindung hergestellt werden kann. Zusätzlich zur gestauchten Passfläche kann das sichernde und axialkraftleitende Bajonettgewinde durch Walzen in die Schraube eingebracht werden, wie in Abbildung 62 dargestellt.

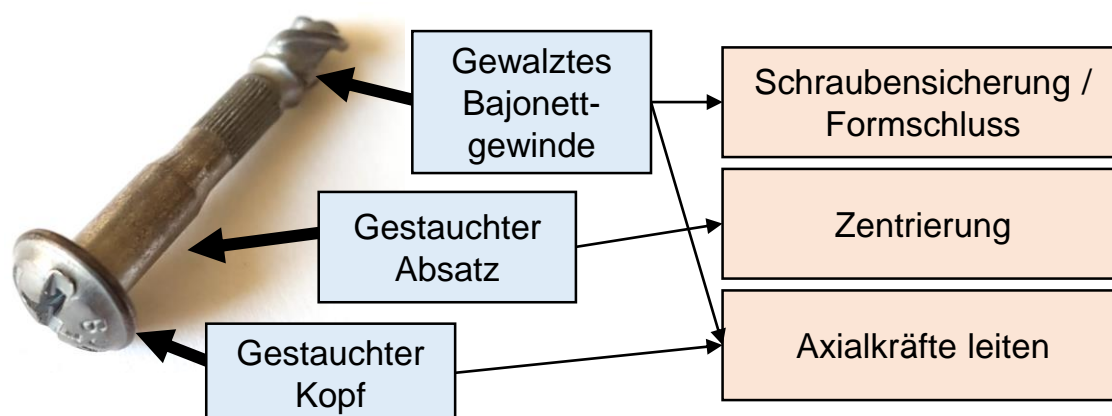


Abbildung 62: Verfahrensinduzierte Gestaltelemente und realisierte Funktionen einer Bajonettverschraubung

Der Integrationsgrad wurde in der Bajonettverschraubung im Vergleich zu einer Schraubenverbindung mit Passstift und Zahnscheibe durch Technologieintegration, die integrale Baustruktur und eine Funktionserweiterung deutlich erhöht, wie in Abbildung 63 dargestellt. Nur ein gestauchtes und gewalztes Einzelteil ist notwendig für die Funktionserfüllung, die um die Zentrierungsfunktion erweitert ist.

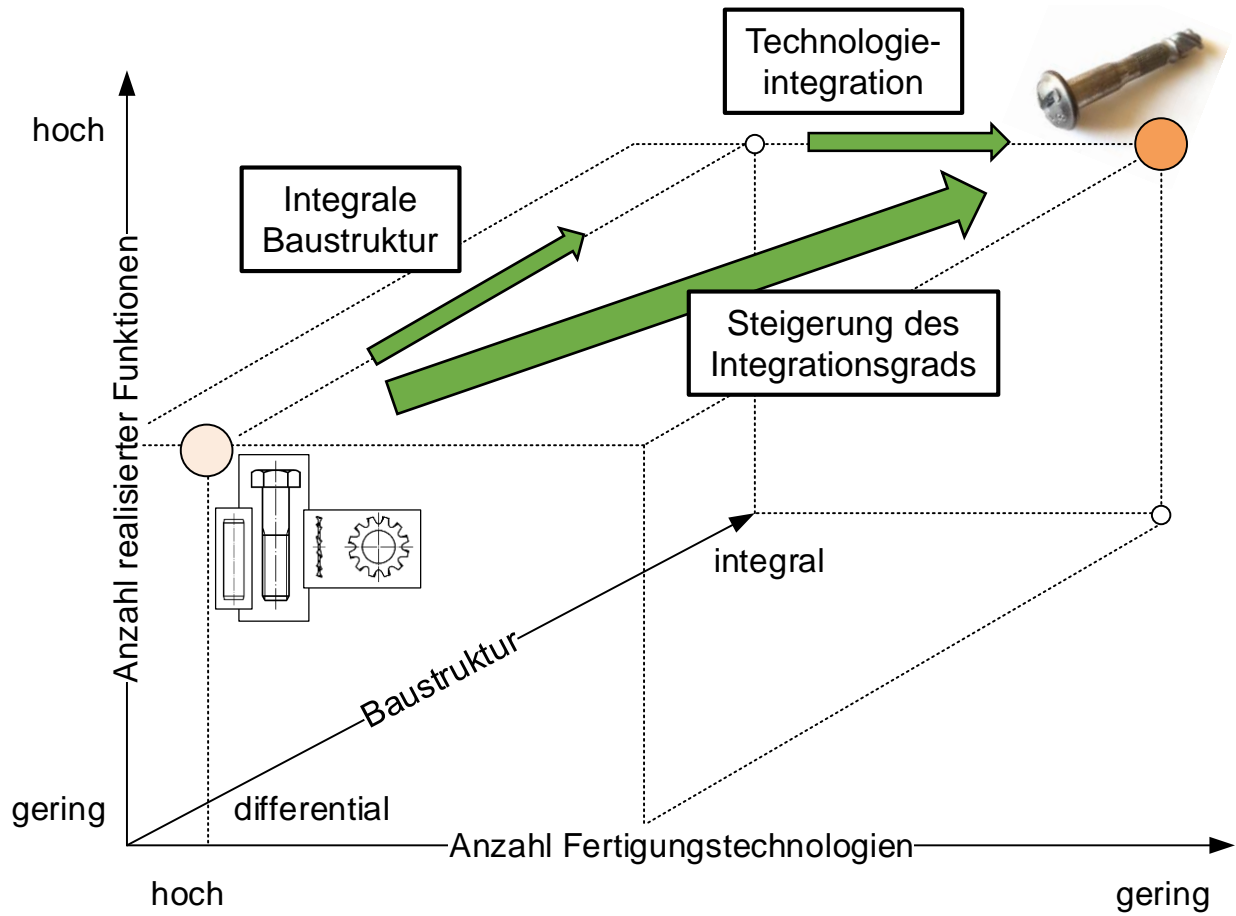


Abbildung 63: Bajonettsschraube mit erhöhtem Integrationsgrad²⁷³

²⁷³ In Auszügen aus DIN ISO 1891 (2009), S. 17, 100, 104.

6 Fazit und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Hilfsmittel und Werkzeuge für die fertigungsgetriebene Funktionsintegration bereitzustellen, mit deren Hilfe der Lösungsraum systematisch um Lösungen erweitert werden kann, die die Möglichkeiten einer Fertigungstechnologie für die Funktionsintegration umfassend ausschöpfen. Funktionsintegration und verwendete Fertigungstechnologien stehen dabei in einem engen Verhältnis zueinander. Aus diesem Grund stellten fertigungsintegrierende Entwicklungsansätze eine wichtige Grundlage für diese Arbeit dar. Ausgehend von einem auf Basis geeigneter Modelle entwickelten Verständnis der fertigungsgetriebenen Funktionsintegration wurden Integrationsstrategien entwickelt, die im Rahmen der Lösungsfindung angewendet werden können, um den Integrationsgrad einer Lösung schrittweise zu erhöhen. Mithilfe der Modellierung auf Basis von Funktionsträgern, Eigenschaften und Gestaltelementen sind im Integrationsgrad Aspekte der Funktion, der Fertigung und der Baustruktur differenziert vertortet und erlauben somit eine gezielte Berücksichtigung der einzelnen Aspekte. Die verwendeten Modelle sind dabei kompatibel mit den Modellen, die einer DPM (Design Pattern Matrix) zugrunde liegen. Mithilfe der DPM lässt sich ein fertigungsgetriebener Entwicklungsansatz operationalisieren. Dadurch steht mit der DPM ein geeignetes Werkzeug zur Verfügung, mit dem die Integrationsstrategien praktisch angewendet und der Lösungsraum gezielt um vielversprechende Lösungen erweitert werden können.

Die DPM kann sowohl ausgehend von verfahrensinduzierten Gestaltelementen und Eigenschaften, als auch ausgehend von allgemeingültigen Funktionsträgern verwendet werden. Dadurch ist gewährleistet, dass die Arbeit mit der DPM kompatibel ist zu bekannten und bewährten Methoden zur Lösungssuche im Rahmen von Innovationsprojekten. Die Einbeziehung von Funktionsträgern auf beliebigen Konkretisierungsstufen erlaubt die frühzeitige Berücksichtigung von Möglichkeiten zur Funktionsintegration. So können bereits Möglichkeiten zur Funktionsintegration auf Wirkprinzipienebene herausgearbeitet werden. Die Arbeit mit der DPM folgt dem Grundgedanken, wesentliche fertigungsbezogene Elemente zunächst zu identifizieren und anschließend mit Funktionsträgern zu verknüpfen. Dadurch, dass diese allgemeingültigen Funktionsträger den verfahrensinduzierten Gestaltelementen der betrachteten Fertigungstechnologien gegenübergestellt werden, wird im Entwicklungsprozess insbesondere der Übergang von abstrakteren Produktmodellebenen zur Produktgestalt hin unterstützt.

Das vorgestellte Vorgehen ist angepasst an den Aufbau der DPM und gliedert sich in einzelne Schritte, die auch für sich allein genommen einen Erkenntnisgewinn bieten können. Durch die erforderlichen Einträge in die DPM gewinnt der Anwender automatisch ein Bewusstsein für die Möglichkeiten der verwendeten Fertigungstechnologien für die Lösungsfindung. Die dem Vorgehen zugrundeliegenden Modelle erlauben in Verbindung mit PIDG (Process-Integrated Design Guidelines) die stetige Dokumentation und Wiederverwendung von erzielten Arbeitsergebnissen und gewonnenen Erkenntnissen. Auch die Anwendung der Integrationsstrategien kann individuell geschehen und damit bei der Entwicklung vielversprechender Lösungen helfen.

Die Arbeit mit der DPM hat also das Potential, ein Bewusstsein dafür zu schaffen, welche zusätzlichen und bislang ungenutzten Gestaltungsmöglichkeiten zur Realisierung von Funktionen in möglicherweise bereits verwendeten Gestaltelementen verborgen sind. Dies kann sowohl für Neuentwicklungen als auch für die Weiterentwicklung lange bewährter Lösungen neue Perspektiven eröffnen.

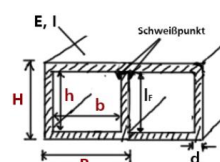
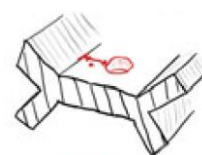
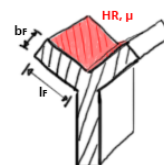
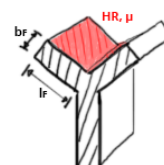
In zukünftigen Arbeiten sollte dieses Potential der DPM zur Lösungsfindung für weitere Fertigungstechnologien und Anwendungen untersucht und ihre Anwendung in der industriellen Praxis erprobt werden.²⁷⁴ Im Rahmen dieser Arbeit wurde aufgrund der Nutzung der DPM im Kontext der fertigungsintegrierenden Funktionsintegration den verwendeten Fertigungstechnologien ein hoher Stellenwert eingeräumt. Funktionsträger könnten innerhalb einer DPM aber beispielsweise auch Modellen anderer Disziplinen gegenübergestellt werden. So könnte die Gegenüberstellung zu Modellen anderer Disziplinen, wie etwa solchen für die Planung von Versuchen, dabei helfen, anstelle von fertigungsintegrierenden Lösungselementen beispielsweise gezielt „prüfstandintegrierende Lösungselemente“ zu generieren, die besonders auf die Untersuchung in Versuchsfeldern angepasst sind. Denkbar wäre auch ein Zugang zur DPM über ausgewählte Werkstoffe anstatt über Fertigungstechnologien.

²⁷⁴ In einer aktuellen Arbeit wird die DPM beispielsweise bereits für das Herausarbeiten der Möglichkeiten von additiven Fertigungsverfahren für die Produktentwicklung eingesetzt (Vgl. Würtenberger et al. (2018)).

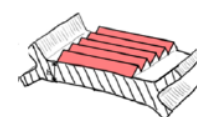
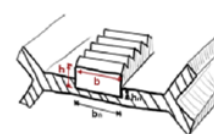
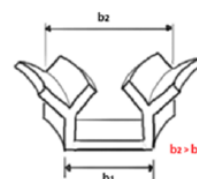
[illegible]

Anhang B – Process-Integrated Design Guidelines

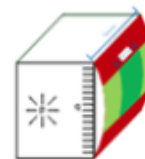
Funktion	PIDG	Gestaltungshinweis	Erklärung
Linear führen	PIDG: Spaltprofilier- te Flan- sche als Führung	Nutze spaltprofi- lierte Flansche mit definiertem Öff- nungswinkel als Li- nearführung mit ge- sperrten Freiheits- graden .	Blechkanten werden beim Spaltprofilieren an Bandkanten in Flansche geformt. (Vgl. Neuwirth et al. (2017))
Wälzkon- taktfläche bereit- stellen	PIDG: Flansch- oberfläche als Wälz- kontaktf lä- che	Nutze die Oberfläche von spaltprofilier- ten Flanschen mit UFG-Gefüge zur Be- reitstellung von Wälzkontaktflä- chen mit hoher Härte, Oberflächen- güte und erreichba- rer Lebensdauer .	UFG-Gefüge weist hohe Härte und ge- ringe Oberflä- chenrauheit auf. (Vgl. Ah- mels et al. (2017))
Funkti- onsträger fügen	PIDG: Pro- zessinte- griertes Fü- gen	Nutze HSC-Bohrun- gen positioniert in der Mitte eines spaltpro- filerten Stegs , um ei- nen Funktionsträger mit hohen Haltekräf- ten zu fügen.	Hohe Eigen- spannungen im Stegbereich ei- nes Spaltprofils können einge- setzt werden, um zusätzliche Elemente in vorher gefer- tigte Bohrun- gen zu fügen. (Vgl. Roos et al. (2017c))
Quer- kräfte lei- ten	PIDG: Ver- zweigungen zur Erhö- hung der Steifigkeit	Nutze spaltgebo- gene Verzweigen- gen , die an den Steg geschweißt werden als integrale Abstüt- zung .	Durch das Schweißen der Verzweigungen entstehen ge- schlossene Kammern, die die Systemstei- figkeit erhöhen. (Vgl. Roos et al. (2017c))



Funktion	PIDG	Gestaltungshinweis	Erklärung
Fluide leiten	PIDG: Verschweißte Verzweigungen zur Bildung dichter Kammern	Nutze spaltgebogene Verzweigungen , die an den Steg geschweißt werden als geschlossene Kammer .	Durch das Schweißen der Verzweigungen entstehen geschlossene Kammern, die Fluide leiten können (Vgl. Roos et al. (2017c))
Position halten	PIDG: Flexibles Spaltprofil mit veränderlichem Abstand zwischen Führungsflächen	Nutze zur Realisierung einer Stoppfunktion einer Linearführung eine auseinanderlaufende Geometrie eines durch flexibles Spalt- und Walzprofilieren gefertigten Blechprofils , um den Abstand zwischen den Laufbahnen zu vergrößern.	Durch den vergrößerten Abstand zwischen zwei spaltprofilierten Führungsflächen kommt es zum Klemmen (Vgl. Wagner et al (2014))
Antriebsfunktion	PIDG: Zahnstange in gefräster Nut	Nutze zur Realisierung einer Antriebsfunktion die Geometrie eines spaltprofilierten Stegs mit zuvor eingefräster Nut in die eine Zahnstange mit passender Geometrie eingesetzt werden kann.	Geometrie der Nut passt zur Geometrie der Zahnstange (Vgl. Wagner et al (2014))
Antriebsfunktion	PIDG: Aufgefräste Zähne für Zahnstangenantrieb	Nutze HSC-gefertigte Zähne auf dem spaltprofilierten Steg (Blechdicke >4 mm) mit passender Geometrie , um Zähne für einen Zahnstangenantrieb mit passendem Modul zu realisieren.	Für eine ausreichende Zahnhöhe muss das Blech mindestens 4 mm dick sein, um die Bearbeitung zu ermöglichen. (Vgl. Wagner et al. (2016))



Funktion	PIDG	Gestaltungshinweis	Erklärung
Position halten	PIDG: Druckbeaufschlagte Kammern	Nutze geschlossene Kammern mit Dichtung und unterschiedlicher Wanddicke als Druckkammern mit einem Freiheitsgrad , um eine gerichtete Verformung für eine Klemmfunktion zu realisieren	Verformung hängt von der Nachgiebigkeit ab, die mit der Wanddicke korreliert (Vgl. Lommatzsch et al. (2011))
Anzugsmoment in Vorspannkraft wandeln	PIDG: Nutzung Gewindewalzen	Nutze das durch Ge- windewalzen erzeugte rotations-symmetrische Profil mit verfestigten und glatten Oberflächen sowie optimalen Faserverlauf zur Erzeugung eines kaltverfestigten Gewindes mit geeigneter Profilart und -parametern, erhöhter Dauerfestigkeit und glatten Oberflächen	Der Faserverlauf folgt der äußeren Kontur des Gewindes und verringert damit, im Vergleich zu spanend erzeugten Gewinden, die Kerbwirkung erheblich. Steigerung der Dauerfestigkeit bis zu 50 %; Materialeinsparung von 20% gegenüber spannenden Verfahren (Vgl. Tschätsch (2005))



Literaturverzeichnis

Ahmels et al. (2017)

Ahmels, L.; Bott, A.-K.; Bruder, E.; Gibbels, M.; Gramlich, S.; Hansmann, M.; Karin, I.; Kohler, M.; Lipp, K.; Melz, T.; Müller, C.; Neufeld, D.; Niehuesbernd, J.; Roos, M.; Tomasella, A.; Ulbrich, S.; Wagener, R.; Walter, A.: Manufacturing Induced Properties: Determination, Understanding, and Beneficial Use. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 99-145.

Bauer (2003)

Bauer, S.: Design for X - Ansätze zur Definition und Strukturierung. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 14. Symposium, Neukirchen, 13. und 14. Oktober 2003. Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik Univ. Erlangen-Nürnberg 2003.

Bauer (2007)

Bauer, S.: Konzept und Umsetzung eines Systems zur strukturierten Sammlung und Bereitstellung von DfX-Richtlinien. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Proceedings of the 18th Symposium on Design for X. DfX 2007. Neukirchen: 2007, S. 13-22.

Becerril et al. (2016)

Becerril, L.; Kattner, N.; Schweigert, S.: Funktionsmodellierung. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser 2016, S. 691-714.

Birkhofer, Kloberdanz (2007)

Birkhofer, H.; Kloberdanz, H.: Skript Produktentwicklung. 2007.

Birkhofer, Wäldele (2008)

Birkhofer, H.; Wäldele, M.: Properties and characteristics and attributes and... - an approach on structuring the description of technical systems. In: Vanek, V.; Hosnedl, S.; Bartak, J. (Hrsg.): Proceedings of the Applied Engineering Design Science Workshop. AEDS 2008. Pilsen, Tschechische Republik: 2008, S. 19-34.

Birkhofer et al. (2012)

Birkhofer, H.; Rath, K.; Zhao, S.: Umweltgerechtes Konstruieren. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München - Wien: Hanser Verlag 2012, S. 563-581.

Boothroyd et al. (2011)

Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. A.: Product Design for Manufacture and Assembly. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press 2011.

Brem, Voigt (2009)

Brem, A.; Voigt, K.-I.: Integration of market pull and technology push in the corporate front end and innovation management—Insights from the German software industry. In: Technovation, 29 (5). 2009, S. 351-367. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2008.06.003>.

Bruder (2011)

Bruder, E.: Thermische Stabilität von Stählen mit ultrafeinkörnigen Gradientengefügen und deren mechanische Eigenschaften. 2011. Dissertation.
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/2415>.

Conrad (2013)

Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2013. <https://doi.org/10.3139/9783446436671>.

DIN 8583-3 (2003)

DIN 8583-3: Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 3: Freiformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Ausg. 2003-09. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2003.

DIN ISO 1891 (2009)

DIN ISO 1891: Mechanische Verbindungselemente – Benennungen. Ausg. 2009. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2009.

DIN 6935 (2011)

DIN 6935: Kaltbiegen von Flacherzeugnissen aus Stahl. Ausg. 2011. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2011.

DIN EN ISO 4014 (2011)

DIN EN ISO 4014: Sechskantschrauben mit Schaft – Produktklassen A und B. Ausg. 2011. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2011.

DIN ISO 12090-1 (2016)

DIN ISO 12090-1: Wälzlager - Profilschienenführungen mit kompakten Kugel- oder Rollenumlaufwagen - Teil 1: Maße und Toleranzen für Serie 1, 2 und 3. Ausg. 2016-08. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2016.

Ehrlenspiel, Meerkamm (2013)

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarbeitete und erw. Aufl. München - Wien: Hanser Verlag 2013. <https://doi.org/10.3139/9783446436275>.

Ellenrieder et al. (2017)

Ellenrieder, G.; Gänsicke, T.; Goede, M.; Herrmann, H. G.; Sandiano, J.: Die Leichtbaustrategien. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017, S. 45-124.

EOS GmbH (2018)

EOS GmbH: Additive Fertigung, Laser-Sintern und industrieller 3D Druck - Vorteile und Funktionsprinzipien. 2018. https://www.eos.info/additive_fertigung/fuer_technologie_interessierte, zuletzt geprüft am 08.04.2018.

Feldhusen et al. (2013)

Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Göpfert, J.; Tretow, G.: Technische Systeme. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. überarbeitete Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2013, S. 237-282.

Förg et al. (2016)

Förg, A.; Karrer-Müller, E.; Kreimeyer, M.: Produktarchitektur. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser 2016, S. 99-109.

Friedrich et al. (2008)

Friedrich, H. E.; Treffinger, P.; Kopp, G.; Knäbel, H.: Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte. In: Schindler, V.; Sievers, I. (Hrsg.): Forschung für das Auto von Morgen. Aus Tradition entsteht Zukunft ; mit 6 Tabellen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 301-348.

Fritz, Schulze (2015)

Fritz, A. H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46555-4>.

Gebhardt (2007)

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing. 3. Aufl. München: Hanser 2007.

Gramlich et al. (2011)

Gramlich, S.; Birkhofer, H.; Bohn, A.: Design Process Automation - a structured product description by properties and development of optimization algorithms. In: Culley, S. J.; Hicks, B. J.; McAloone, T.C.; Howard, T.J.; Clarkson, P. J. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design. ICED 2011. Vol. 1. Kopenhagen, Dänemark: 2011, S. 299-309.

Gramlich (2013)

Gramlich, S.: Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln. Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 423. Düsseldorf: VDI-Verlag 2013. Dissertation.

Gramlich et al. (2015)

Gramlich, S.; Roos, M.; Ahmels, L.; Kaune, V.; Müller, C.; Bauer, O.; Karin, I.; Tomasella, A.; Melz, T.: Ein wissensbasierter fertigungsintegrierender Produktentwicklungsansatz. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Roth, D. (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015. Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft. SSP 2015. Stuttgart: 2015.

Groche et al. (2009)

Groche, P.; Ludwig, C.; Schmitt, W.; Vucic, D.: Herstellung multifunktionaler Blechprofile. In: Werkstattstechnik, 99 (10). 2009, S. 712-720.

Groche et al. (2012a)

Groche, P.; Schmitt, W.; Bohn, A.; Gramlich, S.; Ulbrich, S.; Günther, U.: Integration of manufacturing-induced properties in product design. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61 (1). 2012, S. 163-166.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.041>.

Groche et al. (2012b)

Groche, P.; Birkhofer, H.; Bauer, O.; Göllner, T.; Gramlich, S.; Kaune, V.; Rullmann, F.; Weitzmann, O.: Potenziale einer durchgängigen Produktentstehung - Nutzung technologieinduzierter Eigenschaften zur Entwicklung von Blechstrukturen. In: Konstruktion (11/12). 2012, S. 85-90.

Gürtler, Lindemann (2016)

Gürtler, M. R.; Lindemann, U.: Innovationsmanagement. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser 2016, S. 483-511.

Heidemann (2001)

Heidemann, B.: Trennende Verknüpfung - Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 351. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001. Dissertation.

Heusel, Bronnhuber (2013)

Heusel, J.; Bronnhuber, T.: Blechgerecht. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. überarbeitete Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2013, S. 622-647.

Hoenow, Meißner (2014)

Hoenow, G.; Meißner, T.: Konstruktionspraxis im Maschinenbau. Vom Einzelteil zum Maschinendesign. 4., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. 2014.

Hubka (1984)

Hubka, V.: Theorie technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. 2., völlig Neubearb. und erw. Aufl. Berlin u. a.: Springer Verlag 1984.

Karin et al. (2010)

Karin, I.; Hößbacher, J.; Lommatzsch, N.; el Dsoki, C.; Birkhofer, H.; Hanselka, H.: Spaltprofilierte Linearführungen auf dem Prüfstand. In: Groche, P. (Hrsg.): Tagungsband Sonderforschungsbereich 666, Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung - Entwicklung, Fertigung, Bewertung. 3. Zwischenkolloquium. Vol. 3. Bamberg: 2010, S. 111-116.

Karin et al. (2014)

Karin, I.; Wagner, C.; Lipp, K.; Gramlich, S.; Klobardanz, H.; Melz, T.: Innovative Linearsysteme mit spaltprofilierten Wälzkontaktflächen - Nutzung der Möglichkeiten der kontinuierlichen Fließfertigung zur Funktionsintegration. In: Groche, P. (Hrsg.): Tagungsband Sonderforschungsbereich 666, Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung - Entwicklung, Fertigung, Bewertung. 5. Zwischenkolloquium. Zwischenkolloquium des Sonderforschungsbereichs 666. Bamberg: 2014, S. 123-132.

Karin (2016)

Karin, I.: Zur Verwendung von durch Spaltprofilieren hergestellten Blechstrukturen als wälzbeanspruchte Oberflächen im Vergleich zum Ausgangszustand. 2016. Dissertation.

Kirchner, Birkhofer (2017)

Kirchner, E.; Birkhofer, H.: Maschinenelemente und Mechatronik. 4. überarbeitete Auflage. Aachen: Shaker Verlag 2017.

Klocke (2013)

Klocke, F.: Fertigungsgerecht. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. überarbeitete Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2013, S. 682-696.

Koller (1998)

Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 1998. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80417-5>.

Kurz et al. (2009)

Kurz, U.; Hintzen, H.; Laufenberg, H.: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik. 4., erw. Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009.

Lindemann (2009)

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3., korr. Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2009.

Lommatzsch et al. (2011a)

Lommatzsch, N.; Gramlich, S.; Birkhofer, H.; Bohn, A.: Linear flow-split linear guides: Inflating chambers to generate breaking force. In: Culley, S. J.; Hicks, B. J.; McAloone, T.C.; Howard, T.J.; Lindemann, U. (Hrsg.): Proceedings ICED 2011. 18th International Conference on Engineering Design. ICED 2011. Vol. 4. Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark. [Great Britain]: 2011, S. 337-346.

Lommatzsch et al. (2011b)

Lommatzsch, N.; Gramlich, S.; Birkhofer, H.: Linear guides of linear flow split components - Development and integration of potential additional functions. In: Chakrabarti, A. (Hrsg.): Proceedings of the 3rd International Conference on Research into Design. ICoRD 2011. Bangalore, Indien. Singapur: 2011, S. 439-446.

Ludwig et al. (2008)

Ludwig, C.; Schmitt, W.; Groche, P.; Stein, S.; Abele, E.: Herstellung verzweigter Profile. In: Groche, P. (Hrsg.): Tagungsband Sonderforschungsbereich 666, Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung - Entwicklung, Fertigung, Bewertung. 2. Zwischenkolloquium. Vol. 2. Bamberg: 2008, S. 79-88.

Lüthen et al. (2017)

Lüthen, H.; Gramlich, S.; Horn, B.; Mattmann, I.; Pfetsch, M.; Roos, M.; Ulbrich, S.; Wagner, C.; Walter, A.: Finding the Best: Mathematical Optimization Based on Product and Process Requirements. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 147-200.

Meerkamm et al. (2012)

Meerkamm, H.; Wartzack, S.; Bauer, S.; Krehmer, H.; Stockinger, A.; Walter, M.: Design for X (DFX). In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München - Wien: Hanser Verlag 2012, S. 443-462.

Müller (2013)

Müller, R.: Montagegerecht. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. überarbeitete Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2013, S. 702-725.

Neuwirth et al. (2017)

Neuwirth, M.; Abedini, S.; Abele, E.; Groche, P.; Köhler, S.; Monnerjahn, V.; Schäfer, S.; Schmidt, S.; Turan, E.: New Technologies: From Basic Ideas to Mature Technologies. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 31-97.

Pahl et al. (2007)

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2007.

Pahl et al. (2013a)

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Erstellen eines Konzepts für das Produkt. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. überarbeitete Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2013, S. 341-380.

Pahl et al. (2013b)

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Gestaltungsprinzipien. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. überarbeitete Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2013, S. 539-582.

Ponn, Lindemann (2011)

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2. Aufl. VDI-Buch. Berlin - Heidelberg: Springer 2011.

Rexroth Bosch Group (2006)

Rexroth Bosch Group: Handbuch Lineartechnik. 2006.

Roos et al. (2016)

Roos, M.; Horn, B.; Gramlich, S.; Ulbrich, S.; Klobardanz, H.: Manufacturing Integrated Algorithm-Based Product Design – Case Study of a Snap-Fit Fastening. In: Procedia CIRP, 50. 2016, S. 123-128.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.195>.

Roos et al. (2017a)

Roos, M.; Wagner, C.; Weber Martins, T.; Albrecht, K.; Anderl, R.; Kirchner, E.: Manufacturing-integrated product solutions. Design support between product function and manufacturing processes. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 48 (1). 2017, S. 12-26.

<https://doi.org/10.1002/mawe.201600727>.

Roos et al. (2017b)

Roos, M.; Wagner, C.; Gramlich, S.; Reichwein, J.; Kirchner, E.: Selective Pre-Load Generation: Finding Manufacturing-Integrated Solutions For Linear Guides. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 1: Resource-Sensitive Design|Design Research Applications and Case Studies, Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017. 2017, S. 269-278.

Roos et al. (2017c)

Roos, M.; Abedini, S.; Abele, E.; Albrecht, K.; Anderl, R.; Gibbels, M.; Gramlich, S.; Groche, P.; Horn, B.; Hoßfeld, A.; Köhler, S.; Lüthen, H.; Mattmann, I.; Melz, T.; Monnerjahn, V.; Müller, C.; Neuwirth, M.; Niehuesbernd, J.; Özel, M.; Pfetsch, M.; Reising, J.; Schäfer, S.; Schmidt, S.; Turan, E.; Ulbrich, S.; Wagner, C.; Walter, A.; Weber Martins, T.; Zimmermann, A.: The Result: A New Design Paradigm. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 301-334.

Roos (2018)

Roos, M.: Ein Beitrag zur einheitlichen Modellierung und durchgängigen Nutzung fertigungstechnologischen Wissens im Produktentwicklungsprozess. 2018. Dissertation.

Roth (2000)

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Konstruktionslehre. 3. Aufl., erw. und neu gestaltet. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Nr. 1. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag 2000.

Roth (2001)

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Kataloge. 3. Aufl., mit wesentl. Erg. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Nr. 2. Berlin u. a.: Springer Verlag 2001.

Sauer (2006)

Sauer, T.: Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 390. Düsseldorf: VDI-Verlag 2006. Dissertation.

Schindler (2012)

Schindler, C.: Der allgemeine Konstruktionsprozess - Grundlagen des methodischen Konstruierens. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München - Wien: Hanser Verlag 2012, S. 393-442.

Tekkaya et al. (2015)

Tekkaya, A. E.; Allwood, J. M.; Bariani, P. F.; Bruschi, S.; Cao, J.; Gramlich, S.; Groche, P.; Hirt, G.; Ishikawa, T.; Löbke, C.; Lueg-Althoff, J.; Merklein, M.; Misiolek, W. Z.; Pietrzyk, M.; Shivpuri, R.; Yanagimoto, J.: Metal forming beyond shaping. Predicting and setting product properties. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 64 (2). 2015, S. 629-653.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.001>.

Tschätsch (2005)

Tschätsch, H.: Praxis der Umformtechnik. Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Vieweg Praxiswissen. Wiesbaden - s.l.: Vieweg+Teubner Verlag 2005. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-99432-5>.

VDI 2221 (1993)

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Ausg. 1993-05. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 1993.

VDI 2223 (2004)

VDI 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Ausg. 2004-01. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2004.

VDI/DGQ 3441 (2014)

VDI/DGQ 3441: Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen; Grundlagen. Ausg. 2014. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag 2014.

Wagner et al. (2014)

Wagner, C.; Gramlich, S.; Klobardanz, H.: Entwicklung innovativer Produkte durch Verknüpfung von Funktionsintegration und Fertigungsprozessintegration. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Symposium on Design for X. DfX 2014. Bamberg: 2014, S. 361-372.

Wagner et al. (2015)

Wagner, C.; Gramlich, S.; Monnerjahn, V.; Groche, P.; Klobardanz, H.: Technology Pushed Process and Product Innovation – Joining by Linear Flow Splitting. In: Erkoyuncu, J. (Hrsg.): CIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing. Vol. 37. 2015, S. 83-88.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.065>.

Wagner et al. (2016)

Wagner, C.; Roos, M.; Gramlich, S.; Kloberdanz, H.: Process Integrated Design Guidelines - Systematically Linking Manufacturing Processes to Product Design. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N.; Skec, S. (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Design Conference. DESIGN 2016. Dubrovnik, Kroatien: 2016, S. 739-748.

Wagner et al. (2017)

Wagner, C.; Ahmels, L.; Gramlich, S.; Groche, P.; Monnerjahn, V.; Müller, C.; Roos, M.: Finding New Opportunities: Technology Push Approach. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 275-299.

Wäldele (2012)

Wäldele, M.: Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte. Ein Beitrag für die konventionelle und algorithmenbasierte Produktentwicklung. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 414. Düsseldorf: VDI-Verlag 2012. Dissertation.

Würtenberger et al. (2018)

Würtenberger, J.; Reichwein, J.; Kirchner, E.: Using the potentials of additive manufacturing by a systematic linkage of the manufacturing process to product design. In: Proceedings of the 15th International Design Conference. DESIGN 2018. Dubrovnik. Croatia, May 21-24. (noch nicht veröffentlicht). 2018.

Ziebart (2012)

Ziebart, J. R.: Ein Konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration. München: Dr. Hut 2012. Dissertation.

Eigene Veröffentlichungen

2014

Wagner, Christian; Gramlich, Sebastian; Kloberdanz, Hermann: Entwicklung innovativer Produkte durch Verknüpfung von Funktionsintegration und Fertigungsprozessintegration. 25. DfX Symposium 2014. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Proceedings of the 24th Symposium on Design for X. DfX 2014. Bamberg: 2014, S. 361-372.

Karin, Ivan; Wagner, Christian; Lipp, Klaus; Gramlich, Sebastian; Kloberdanz, Hermann; Melz, Tobias: Innovative Linearsysteme mit spaltprofilierten Wälzkontaktflächen – Nutzung der Möglichkeiten der kontinuierlichen Fließfertigung zur Funktionsintegration. In: Groche, Peter (Hrsg.): Tagungsband Sonderforschungsbereich 666, Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung – Entwicklung, Fertigung, Bewertung. 5. Zwischenkolloquium des Sonderforschungsbereichs 666. Bamberg: 2014, S. 123-132.

2015

Wagner, Christian; Gramlich, Sebastian; Monnerjahn, Vinzent; Groche, Peter; Kloberdanz, Hermann: Technology pushed process and product innovation – Joining by Linear Flow Splitting. In: Erkoyuncu, J. (Hrsg.): CIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing. Vol. 37. 2015, S. 83-88.

2016

Wagner, Christian; Roos, Michael; Gramlich, Sebastian; Kloberdanz, Hermann: Process Integrated Design Guidelines – Systematically Linking Manufacturing Processes to Product Design. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N.; Skec, S. (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Design Conference. DESIGN 2016. Dubrovnik, Kroatien: 2016, S. 739-748.

2017

Roos, Michael; Wagner, Christian; Weber Martins, Thiago; Albrecht, Katharina; Anderl, Reiner; Kirchner, Eckhard: Manufacturing-integrated Product Solutions: Design Support between Product Function and Manufacturing Processes. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 48 (1). 2017, S. 12-26.

- Monnerjahn, Vinzent; Gramlich, Sebastian; Groche, Peter; Roos, Michael; Wagner, Christian; Weber Martins, Thiago: Introduction: Production Technologies and Product Development. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 1-9.
- Lüthen, Hendrik; Gramlich, Sebastian; Horn, Benjamin; Mattmann, Ilyas; Pfetsch, Marc; Roos, Michael; Ulbrich, Stefan; Wagner, Christian; Walter, Anna: Finding the Best: Mathematical Optimization Based on Product and Process Requirements. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 147-200.
- Wagner, Christian; Ahmels, Laura; Gramlich, Sebastian; Groche, Peter; Monnerjahn, Vinzent; Müller, Clemens; Roos, Michael: Finding New Opportunities: Technology Push Approach. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 275-299.
- Roos, Michael; Abedini, Scholeh; Abele, Eberhard; Albrecht, Katharina; Anderl, Reiner; Gibbels, Marius; Gramlich, Sebastian; Groche, Peter; Horn, Benjamin; Hoßfeld, Alexander; Köhler, Stefan; Lüthen, Hendrik; Mattmann, Ilyas; Melz, Tobias; Monnerjahn, Vinzent; Müller, Clemens; Neuwirth, Manuel; Niehuesbernd, Jörn; Özel, Mahmut; Pfetsch, Marc; Reising, Jakob; Schäfer, Stefan; Schmidt, Sebastian; Turan, Emrah; Ulbrich, Stefan; Wagner, Christian; Walter, Anna; Weber Martins, Thiago; Zimmermann, Adrian: The Result: A New Design Paradigm. In: Groche, P.; Bruder, E.; Gramlich, S. (Hrsg.): Manufacturing Integrated Design. Sheet Metal Product and Process Innovation. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 301-334.
- Roos, Michael; Wagner, Christian; Gramlich, Sebastian; Reichwein, Jannik; Kirchner, Eckhard: Selective Pre-load Generation: Finding Manufacturing-integrated Solutions for Linear Guides. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 1: Resource-Sensitive Design|Design Research Applications and Case Studies, Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017. 2017, S. 269-278.

Betreute studentische Arbeiten

2014

Charfi, Slim; Döring, Hans Christian; May, Alexander; Schmidt, Lisa; Sell, Georg; Vogel, Sven: Konzipierung einer innovativen spaltprofilierten Lineareinheit zum Einsatz in Fassadenreiniger. Advanced Design Project, 2014.

Eller, Dominik; Gute, Heike; Griesel, Dominic; Hau, Raphael René: Konstruktion eines Linearsystems mit spaltprofilierten Führungsflächen und integriertem Linearmotor-Antrieb. Advanced Design Project, 2014.

Camborda, Juan Carlos; Döring, Hans Christian; Eller, Dominik; Gute, Heike; Köppen, Christopher; Vogel, Sven: Systematische Integration fertigungstechnologischer Aspekte in die Produktentwicklung. Forschungsseminar, 2014.

Spies, Christian: Wechselbeziehungen von Anforderungen und Produkteigenschaften am Beispiel von Linearsystemen. Studienarbeit, 2014.

Wenzel, Jan: Konstruktive Möglichkeiten zur Beherrschung der Einflüsse von Fertigungstoleranzen auf die Funktionszuverlässigkeit von spaltprofilierten Linearsystemen. Bachelor-Thesis, 2014.

2015

Al-Baradoni, Nassr: Konzeption und Implementierung eines Messsystems zum Einsatz in einem Prüfstand für spaltprofilierte Linearsysteme. Bachelor-Thesis, 2015.

Dieter, Daniel: Konstruktion eines Systems zur Aufbringung von Prüfkräften auf spaltprofilerte Linearsysteme. Bachelor-Thesis, 2015.

Henrich, Sebastian: Konstruktion eines Linearsystem-Schlittens zum Einsatz in spaltprofilierten Führungsschienen. Bachelor-Thesis, 2015.

2016

Sachdeva, Veschal: Entwicklung integrierter Lösungen zur aktiven Beeinflussung der Vorspannung bei spaltprofilierten Linearführungen. Bachelor-Thesis, 2016.

Wenzel, Jan: Entwicklung und Umsetzung eines Prüfkonzpts für spaltprofilerte Linearsysteme. Master-Thesis, 2016.

2017

Rieckmann, Matthias: Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Vorspannung auf Linearsysteme mit spaltprofilierten Linearführungen. Bachelor-Thesis, 2017.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Christian Richard Oliver Wagner
Geburtsdatum: 22.11.1987
Geburtsort: Frankfurt am Main
Nationalität: Deutsch

Ausbildung und beruflicher Werdegang

08/1997 – 06/2006	Leibniz-Gymnasium Offenbach; Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
10/2006 – 10/2007	Studium der Psychologie, Goethe-Universität Frankfurt am Main
10/2007 – 04/2014	Studium des Maschinenbaus, Technische Universität Darmstadt; Abschluss: Master of Science
08/2009 – 05/2010	Auslandsstudium im Rahmen des ERASMUS-Pro- gramms am Department of Mechanical Engineering, University of Glasgow
04/2014 – 06/2017	Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 666 “Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung – Ent- wicklung, Fertigung, Bewertung“
04/2014 – 04/2018	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Uni- versität Darmstadt, Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd)